



Análisis y simulación de caudales en las cuencas de los ríos Nús y Penderisco en el contexto del cambio climático y la gestión del riesgo en Antioquia

Nicolás Peña Ortega
Manuel Anastacio Rodríguez de la Ossa

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingenieros Ambientales

Asesores
David Aguiar Gil, Magíster (MSc) en Ingeniería
Geusep Martin Ortega Villamizar, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental

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

Cita	(Peña Ortega & Rodríguez de la Ossa, 2023)
Referencia	Peña Ortega, N., & Rodríguez de la Ossa, M. A. (2023). <i>Análisis y simulación de caudales en las cuencas de los ríos Nús y Penderisco en el contexto del cambio climático y la gestión del riesgo en Antioquia</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina María Berrouet Cadavid.

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

Dedicatoria

Dedicamos nuestro trabajo de grado principalmente a nuestros padres, por todo su apoyo durante el transcurso de nuestra carrera y por motivarnos a seguir hacia adelante.

También a nuestros hermanos, por brindarnos su apoyo incondicional en los momentos que más lo necesitábamos.

Y, finalmente a todas esas personas que de una u otra forma aportaron en nuestra formación académica como ingenieros.

Agradecimientos

Agradecemos al profesor David Aguiar Gil quien nos acompañó en nuestro proceso de formación y nos brindó la posibilidad de desarrollar este trabajo de grado. De igual forma, le agradecemos por todos los conocimientos y buenos hábitos transmitidos.

Agradecemos a nuestro co-asesor Geusep Martin Ortega Villamizar de quien aprendimos muchos conceptos y herramientas matemáticas durante la elaboración de este trabajo y nos enseñó el día a día de la buena práctica científica.

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo en todo este proceso y por darnos la libertad de elegir y formar nuestra propia vertiente de pensamiento.

Agradecemos al claustro de profesores de la escuela ambiental de la Universidad de Antioquia quienes compartieron sus conocimientos para formarnos como buenos ingenieros.

Finalmente, agradecemos a la Universidad de Antioquia y al Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia por su apoyo económico parcial en el desarrollo de este trabajo bajo el convenio interadministrativo 4600014115.

Índice

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	17
2 Zona de estudio	18
2.1 Criterios de selección de la cuenca del río Nús	18
2.2 Cuenca del río Nús	19
2.2.1 Régimen de precipitación y temperatura media	20
2.2.2 Parámetros morfométricos	22
2.2.3 Caracterización de la amenaza en la cuenca del río Nús	23
2.2.4 SAMA en la cuenca del río Nús	24
2.3 Criterios de selección de la cuenca del río Penderisco	25
2.4 Cuenca del río Penderisco	26
2.4.1 Régimen de precipitación y temperatura media	26
2.4.2 Parámetros morfométricos	29
2.4.3 Caracterización de la amenaza en la cuenca del río Penderisco	29
2.4.4 SAMA en la cuenca del río Penderisco	30
3 Marco teórico	32

4	Metodología	36
4.1	Recopilación de información	36
4.1.1	Precipitación y caudales in-situ	36
4.1.2	Evapotranspiración potencial	40
4.1.3	Modelos de Elevación Digital – DEM	40
4.2	Implementación del modelo GR4J	41
4.3	Implementación del modelo HEC-HMS	46
4.3.1	Loss	47
4.3.2	Transform	47
4.3.3	Routing	48
4.3.4	Baseflow	48
4.3.5	Análisis de sensibilidad	48
4.3.6	Generación de crecientes para tormentas de diseño	49
4.4	Evaluación del rendimiento de los modelos	49
4.5	Evaluación de escenarios de CC	50
4.6	Análisis de frecuencia	52
5	Resultados.	56
5.1	Calibración, validación y periodo de control del modelo GR4J	56
5.2	Calibración del modelo HEC-HMS	58
5.3	Simulación de tormentas a partir de tormentas de diseño con diferente periodo de retorno	58
5.4	Escenarios de CC	62

5.4.1	2040 - 2060	62
5.4.2	2060 - 2080	66
5.4.3	2080 - 2100	69
5.5	Análisis de frecuencia	73
6	Conclusiones	76
	Referencias	79
	Anexos	84
	Anexo 1.	84
	Anexo 2.	85

Lista de tablas

1	Eventos hidrometeorológicos históricos en el municipio de Cisneros	18
2	Estaciones IDEAM utilizadas para la caracterización del régimen de precipitación de la cuenca del río Nús	21
3	Parámetros morfométricos de la cuenca del río Nús	22
4	Eventos hidrometeorológicos históricos en el municipio de Urrao	25
5	Estaciones IDEAM utilizadas para la caracterización del régimen de precipitación de la cuenca del río Penderisco	28
6	Parámetros morfométricos de la cuenca del río Penderisco	29
7	Estaciones empleadas para la reconstrucción de las series de precipitación sobre las cuencas de los ríos Nús y Penderisco	38
8	Parámetros de calibración del modelo GR4J	42
9	Modelos seleccionados para la simulación del escenario de CC de acuerdo con las variables a evaluar	51
10	Parámetros calibrados para las simulaciones de caudal máximo y medio con el modelo GR4J para las cuencas de los ríos Nús y Penderisco	57
11	Valores iniciales y optimizados resultantes de la prueba de sensibilidad	58
12	Ajuste de las funciones de distribución de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste	73
13	Caudales máximos observados y periodos de retorno correspondientes según el ajuste a la FDP	74

Lista de figuras

1	Punto de instalación del sensor de nivel sobre el río Nús	19
2	Cuenca del río Nús e instrumentación del SAMA	20
3	Régimen de precipitación de las estaciones IDEAM cercanas a la cuenca del río Nús	21
4	Tiempo de concentración de la cuenca del río Nús	23
5	Mapa de amenaza por avenidas torrenciales para un escenario de 50 mm/día para la cuenca del río Nús	24
6	Punto de instalación del sensor de nivel sobre A) el río Penderisco y B) el río Pabón	26
7	Cuenca del río Penderisco e instrumentación del SAMA	27
8	Régimen de precipitación de las estaciones IDEAM cercanas a la cuenca del río Penderisco	28
9	Tiempo de concentración de la cuenca del río Penderisco	30
10	Mapa de amenaza por avenidas torrenciales para un escenario de 50 mm/día para la cuenca del río Penderisco	31
11	Estaciones IDEAM utilizadas para simulación y reconstrucción de series de datos por el método de la precipitación normal para la cuenca de los ríos Nús (arriba) y Penderisco (abajo)	37
12	Delimitación de cuenca y subcuencas junto con los tramos (reach) generados por HEC-HMS	41
13	Diagrama conceptual del funcionamiento del modelo GR4J	45
14	Distribución espacial de las cuencas de los ríos Nús y Penderisco sobre los pixeles de las bases de datos CMIP5, CMIP6 y CORDEX	52
15	Calibración y validación de caudales máximos en el modelo GR4J	56

16	Calibración y validación de caudales medios en el modelo GR4J	57
17	Escenario de control de caudales máximos y medios para las cuencas de los ríos Nús y Penderisco	59
18	Calibración del modelo de crecientes para el evento del 7 de enero de 2023 .	60
19	Hietogramas de diseño	61
20	Crecientes obtenidas a partir de las tormentas de diseño para diferentes periodos de retorno	62
21	Tendencias de la precipitación y de la temperatura proyectadas por los modelos durante el periodo 2040-2060	63
22	Ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de los modelos contrastado con el ciclo medio mensual obtenido de las mediciones in situ para el periodo 2040 - 2060	64
23	Ciclo medio mensual multianual de precipitación una vez agregada la tendencia a la serie de tiempo original y regímenes de caudales máximos y medios una vez ingresada la precipitación alterada con las tendencias de cambio climático en los modelos para el periodo 2040 - 2060	65
24	Tendencias de la precipitación y de la temperatura proyectadas por los modelos durante el periodo 2060-2080	66
25	Ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de los modelos contrastado con el ciclo medio mensual obtenido de las mediciones in situ para el periodo 2060 - 2080	67
26	Ciclo medio mensual multianual de precipitación una vez agregada la tendencia a la serie de tiempo original y regímenes de caudales máximos y medios una vez ingresada la precipitación alterada con las tendencias de cambio climático en los modelos para el periodo 2060 - 2080	68
27	Tendencias de la precipitación y de la temperatura proyectadas por los modelos durante el periodo 2080-2100	69

28	Ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de los modelos contrastado con el ciclo medio mensual obtenido de las mediciones in situ para el periodo 2080 - 2100	70
29	Ciclo medio mensual multianual de precipitación una vez agregada la tendencia a la serie de tiempo original y regímenes de caudales máximos y medios una vez ingresada la precipitación alterada con las tendencias de cambio climático en los modelos para el periodo 2080 - 2100	72
30	Caudales máximos y medios para los ríos Penderisco y Nús	75

Resumen

El diseño de los sistemas de alertas tempranas basado en criterios técnicos (o físicos) de la dinámica de las cuencas se complementa con la caracterización de las corrientes mediante simulaciones numéricas con enfoque en la gestión del riesgo (GR). Los ríos Nús y Penderisco son corrientes de interés para la GR en el departamento de Antioquia debido a la frecuencia y magnitud de eventos (inundaciones y crecientes súbitas) registrados en las bases de datos en los últimos años. En este estudio se buscó caracterizar, a través de modelación hidrológica, las cuencas de los ríos Nús y Penderisco, para ello, se implementaron los modelos hidrológicos GR4J, con el cual se realizaron simulaciones de los caudales medios y máximos de las cuencas de interés durante 20 años, y HEC-HMS, para simular crecientes sobre la cuenca del río Nús. Además, se analizaron los escenarios de cambio climático RCP8.5 y SSP5-85 para evaluar su influencia en el régimen de caudales y precipitación a corto, mediano y largo plazo. Por último, se realizó un análisis de frecuencias sobre las series de caudal (diaria) para determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos ante diferentes periodos de retorno. En general, CMIP5 (CORDEX) generó un aumento (disminución) en el régimen de caudales durante todo el año y en los periodos analizados. El análisis de frecuencias mostró una disminución en el periodo de retorno de eventos extremos para la cuenca del río Penderisco por lo cual se espera un aumento en la ocurrencia de caudales máximos.

Palabras clave: cambio climático, gestión del riesgo, GR4J, HEC-HMS

Abstract

The design of early warning systems based on technical (or physical) criteria of basin dynamics is complemented by the characterization of currents through numerical simulations focused on risk management (RM). The Nús and Penderisco rivers are of interest for RM in the department of Antioquia due to the frequency and magnitude of events (floods and sudden rises) recorded in databases in recent years. This study aimed to characterize the Nús and Penderisco river basins through hydrological modeling. The GR4J hydrological models were implemented to simulate the mean and maximum flow rates of the basins of interest over 20 years, and the HEC-HMS was used to simulate sudden rises in the Nús river basin. In addition, the climate change scenarios RCP8.5 and SSP5-85 were analyzed to evaluate their influence on the flow and precipitation regime in the short, medium, and long term. Finally, a frequency analysis was performed on the flow series (daily) to determine the probability of extreme events occurring under different return periods. Overall, CMIP5 (CORDEX) generated an increase (decrease) in the flow regime throughout the year and in the analyzed periods. The frequency analysis showed a decrease in the return period of extreme events for the Penderisco river basin, which is expected to lead to an increase in the occurrence of maximum flow rates.

Keywords: climate change, GR4J, HEC-HMS, risk management

Introducción

La oficina de las Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres (UNISDR) define un desastre desencadenado por una amenaza natural como la alteración del funcionamiento de una comunidad que causa pérdidas multidimensionales (pérdidas humanas, materiales, etc.) que superan la capacidad de respuesta de esta (Naciones Unidas (ONU), 2009). La anterior definición indica que un desastre es el resultado de una concatenación de factores naturales y sociales, siendo las amenazas hidrometeorológicas (inundaciones, sequías, avenidas torrenciales, crecientes súbitas, etc.), originadas a partir de eventos meteorológicos o hidrológicos extremos que históricamente han causado efectos adversos sobre la población humana desde impactos a la salud, lesiones e incluso la muerte; convirtiendo las amenazas naturales en las de mayor preocupación debido a la magnitud de los daños que causan. Lo anterior se ve reflejado en los históricos registrados, entre 1995 y 2004 se estima la ocurrencia de seis mil desastres, en su mayoría de origen hidrometeorológico. Además, debido al aumento de la densidad poblacional en las zonas vulnerables, la modificación y degradación de los entornos naturales junto con el asentamiento en llanuras de inundación y la erosión del suelo, se ha observado que el aumento de las personas que se ven afectadas por estos eventos tiende a aumentar año tras año (Basher, 2006; Domínguez y Lozano, 2014; ONU, 2009).

En consecuencia, de lo anterior, con el objetivo de reducir los daños y eventos catastróficos, en especial en los países en vía de desarrollo, en los cuales los desastres tienen efectos de mayor proporción y se reconoce con frecuencia como una dificultad importante para el desarrollo enmarcado en los ODS, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), ha llevado a cabo cumbres de alcance global para que la comunidad internacional preste especial atención en la reducción del riesgo ante desastres naturales haciendo énfasis en el fenómeno ENSO (El Niño Oscilación Del Sur, por sus siglas en inglés) debido a sus fuertes impactos hidrometeorológicos, sociales y ambientales a nivel global y que ha sido ampliamente investigado en Colombia. La primera cumbre se realizó en Yokohama (Japón) en 1994, dando los primeros lineamientos para la implementación de los sistemas de alerta temprana (SAT) como estrategia de acción ante el riesgo. Posteriormente, en el año 2005, se realizó en Hyogo la conferencia internacional para la reducción de desastres en la cual se adopta la “Estrategia de Yokohama” para el establecimiento de guías sobre la reducción de riesgo de desastres y sus impactos. La última cumbre fue llevada a cabo en Sendai en el año 2015, en la cual se establecieron las prioridades para la gestión del riesgo de desastres y se establece la plataforma web Desinventar (<https://www.desinventar.net/>) como una herramienta conceptual y metodológica para la construcción conjunta de bases de datos de efectos ocasionados

por emergencias o desastres que permite realizar análisis a una escala espacial y temporal (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2013; UNDRR, 2022).

La gestión del riesgo requiere previamente caracterizar la cuenca hidro climatológicamente, de manera que se conozcan cuantitativamente que tan extremos pueden ser los eventos, incluyendo además la influencia por cambio climático. Especialmente para Colombia, el ciclo hidrológico se ve altamente influenciado por cambio climático (CC) y la variabilidad climática (VC) (Magrin et al., 2014; Ortega et al., 2021; Arias et al., 2021). Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) el CC ha llevado a un incremento de las amenazas hidrometeorológicas (Domínguez y Lozano, 2014). Particularmente, las proyecciones para finales de siglo para Colombia, según los resultados de la sexta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6, por sus siglas en inglés), indican un aumento de la precipitación en el Amazonas durante los meses de marzo-abril-mayo, y una reducción para la Orinoquía colombiana durante los meses desde junio hasta noviembre. Por otro lado, sobre las regiones Caribe y Andina, los modelos no muestran acuerdo en las proyecciones de la precipitación para finales de siglo (Arias et al., 2021). Sin embargo, es importante resaltar que el IPCC en su último reporte concluye con un nivel de confianza alta aumento de la temperatura, la humedad y posiblemente en la frecuencia/magnitud de inundaciones para gran parte de la región Andina y Caribe (Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), 2022).

Al referirnos a la variabilidad climática (VC) en la zona de estudio, diversos autores coinciden en señalar al ENSO tanto en su fase fría (La Niña) como en su fase cálida (El Niño), como el fenómeno océano-atmosférico dominante de la VC (Poveda et al., 2005) en Colombia y que además genera un alto impacto a nivel socioeconómico en Centro y Suramérica (López García et al., 2017). Los efectos del ENSO varían según su fase y estos no son homogéneos en el territorio nacional. Durante la fase cálida la temperatura superficial del Océano Pacífico en la región Niño 3.4 aumenta, debilitando la lengua fría y desplazando la piscina caliente hacia el Pacífico central, los cambios en la circulación generan una reducción de las precipitaciones principalmente en la región Caribe, Andina y el norte de la región Pacífico, provocando sequías y desabastecimiento dependiendo de la intensidad del evento y la capacidad de respuesta de las instituciones en el tiempo. La fase fría presenta un comportamiento contrario, la temperatura en la parte central del Océano Pacífico tropical disminuye, se fortalece la lengua fría y se confina la piscina caliente: en Colombia se evidencia un incremento en la precipitación, la humedad del suelo y aumento de los caudales/niveles de los ríos principalmente sobre la región Caribe, Andina y norte de la región Pacífico (Poveda

y Mesa, 1996).

Los escenarios extremos de ambas fases son complejos y representan un reto para las instituciones en términos de conocimiento, reducción del riesgo y la atención de emergencias o desastres; pero es el aumento de las lluvias lo que tiene una influencia directa en el nivel de los ríos o quebradas, así, los eventos extremos de precipitación pueden desencadenar inundaciones (asociado a eventos extremos por duración), crecientes súbitas (asociado a eventos extremos de intensidad), o puede movimientos en masa que favorecen la ocurrencia de avenidas torrenciales. Es por esto que los picos de máxima precipitación en el régimen de lluvias y los eventos La Niña son de especial interés en la caracterización del diseño de los SAT. En Colombia, el Departamento de Antioquia, por sus características geológicas, tectónicas, climáticas y sociales, es uno de los más propensos a los fenómenos naturales que originan catástrofes, siendo las avenidas torrenciales las de mayor relevancia por su poder destructivo (Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS), 2001).

En el ejercicio constante del aumento conocimiento y la reducción del riesgo, son los SAT la estrategia más efectiva de gestión del riesgo, especialmente para cuencas con un alto riesgo asociado a fenómenos hidrometeorológicos extremos. En esencia, un SAT se puede definir como el conjunto de herramientas que las instituciones correspondientes implementan para predecir, monitorear y alertar de manera oportuna eventos que representen riesgos a las comunidades expuestas y que permita tomar medidas de acción temprana para mitigar, reducir o eliminar los impactos de los desastres naturales en términos de pérdidas económicas y especialmente de vidas (Domínguez y Lozano, 2014).

Según Basher (2006) la efectividad de un SAT depende de la presencia de cuatro (4) elementos que funcionan de manera conjunta, permanente en el tiempo y de forma interconectada, dichos elementos son:

- Conocimiento del riesgo.
- Servicio de monitoreo y alerta.
- Difusión y comunicación.
- Capacidad de respuesta.

Ante el escenario de riesgo del departamento de Antioquia y la ruta de trabajo de implementación de una red de monitoreo se planteó el desarrollo de este trabajo en el marco

del convenio interadministrativo 4600014115 entre la Universidad de Antioquia y el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN) con el objeto de aunar esfuerzos técnicos, administrativos y logísticos para fortalecer el proceso de conocimiento de riesgo en el territorio antioqueño, mediante la implementación del Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia (SAMA) del cual este trabajo fue base. Además, dentro del pilar de difusión y comunicación, parte del trabajo quedó público al integrarse con el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIGRAN).

Específicamente, este trabajo de grado se enmarca en aporte al conocimiento del riesgo de inundaciones y crecientes súbitas, así como en la estructuración y diseño de la red de monitoreo pluviométrica, limnigráfica y meteorológica como ejercicio de campo. El propósito principal fue construir un modelo hidrológico para simular caudales medios y máximos en la cuenca del Río Nús y el Río Penderisco, los cuales son corrientes priorizadas por el SAMA, y realizar un análisis del régimen de precipitación y caudal actual de las cuencas. Posteriormente, se analizó cómo sería el comportamiento de los caudales a diferentes periodos de retorno (análisis de frecuencia) y cómo estos pueden cambiar a corto, mediano y largo plazo bajo los escenarios de cambio climático RCP8.5 y SSP5-8.5. La cuantificación de los cambios proyectados se usó para realizar modelaciones hidráulicas indicando los posibles cambios en la dinámica de crecientes ante eventuales cambios en la precipitación.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Simular los caudales máximos y medios en las cuencas del río Nús y el río Penderisco los cuales se encuentran priorizados y son estratégicos en el contexto del SAMA en el presente y bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 y SSP5-8.5 a corto, mediano y largo plazo.

1.2 Objetivos específicos

- Describir el régimen de precipitación y caudal de las cuencas.
- Calibrar y validar los modelos hidrológicos para obtener el escenario de control y el modelo de crecientes.
- Determinar los caudales máximos de las corrientes asociadas a las cuencas seleccionadas mediante análisis de frecuencias y modelación hidrológica.
- Analizar el comportamiento y tendencia de la precipitación y la temperatura superficial del aire de las cuencas seleccionadas bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 del proyecto CORDEX y CMIP-5 junto con las proyecciones del escenario SSP585 del proyecto CMIP-6 con el fin de analizar las proyecciones de las variables sobre las cuencas estudiadas.
- Comparar los resultados obtenidos entre las proyecciones de los 3 experimentos planteados previamente con el escenario de control y entre estos mismos e identificar qué efectos puede tener el cambio climático en el régimen hidrológico de las cuencas a corto, mediano y largo plazo.

2 Zona de estudio

2.1 Criterios de selección de la cuenca del río Nús

De acuerdo con el histórico de eventos se identificaron varias comunidades vulnerables ante crecientes del río Nús y sus tributarios (Tabla 1). Las condiciones ideales para la instalación y monitoreo de corrientes mediante sensores de nivel incluyen que el tramo a instrumentar sea recto, con flujo laminar, que posea un lecho no rocoso y que no se evidencien playas o trenzamiento en el lecho. El sensor de nivel que monitorea el río Nús fue instalado en el sector conocido como Puente Sapo (-75,11026, 6,83663), zona rural del municipio de Cisneros y parte alta de la cuenca. Este instrumento no fue instalado por el equipo técnico actual del SAMA, sino que fue recibido del convenio anterior e instalado por el anterior ejecutor del proyecto. Como parte del seguimiento a estas estaciones se realizó una comisión en la cual se verificó la instalación del instrumento.

Tabla 1

Eventos hidrometeorológicos históricos en el municipio de Cisneros

Ubicación	Tipo(s) de evento(s)	Fuente	Observaciones
Zona urbana	Inundación	DAGRAN	8/5/2006
Zona rural corregimiento Los Palomos	Inundación	DAGRAN	6/11/2007
Zona urbana barrios Clavellina, Cataca, Versalles y La Vega	Inundación	DAGRAN	16/11/2016
Zona urbana	Inundación	UNGRD	7/20/2018
Zona urbana	Inundación	UNGRD	10/23/2019
Zona rural	Inundación	UNGRD	25/05/2021
Zona urbana	Inundación	UNGRD	31/05/2021

En la Figura 1 se observa que el tramo de instalación seleccionado por el operador anterior no cumple con algunos de los requisitos de instalación óptima como que el lecho no sea rocoso o que el flujo sea laminar. Sin embargo, en el recorrido realizado no se evidenciaron puntos que cumplieran con todas las condiciones ideales. Por lo anterior se valida como el punto adecuado para ser instrumentado.

Figura 1

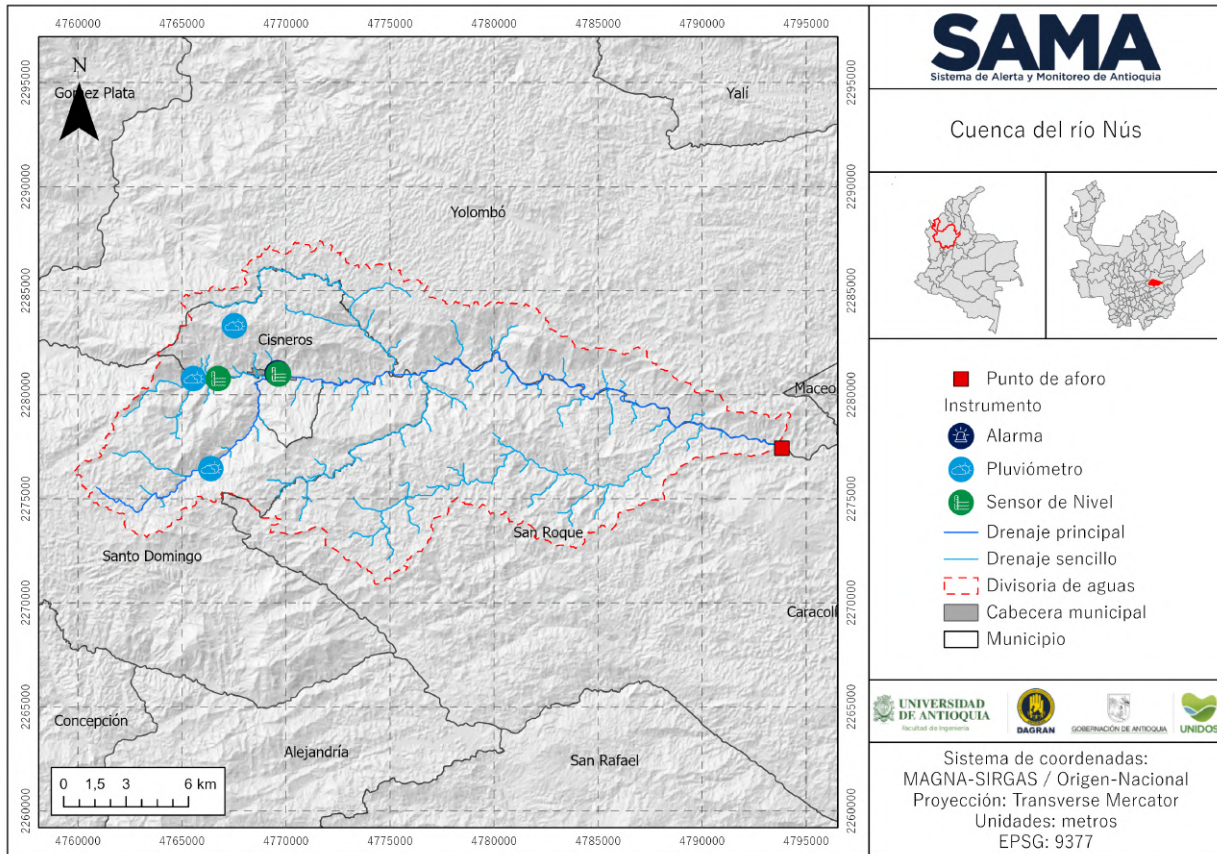
Punto de instalación del sensor de nivel sobre el río Nús



2.2 Cuenca del río Nús

El río Nús nace en el municipio de Santo Domingo a 2.000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) desembocando, después de un trayecto de 96 km, al río Nare en el municipio de Caracolí a una altura de 138 m.s.n.m. Sus principales afluentes son las quebradas Santa Gertrudis, Guacas, Betulia y La Reina, río Socorro, Quebrada La Vega y Dolores. El área de la cuenca es de 850,51 km² y un 42,5 % es jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los ríos Negro y Nare (Cornare), dentro de los límites políticos de los municipios de Santo Domingo y San Roque, y el otro 57,5 % es jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA, correspondiente a los municipios de Cisneros, Yolombó, Maceo, Caracolí, Puerto Nare y Puerto Berrío. La economía de los habitantes de la cuenca históricamente ha sido la minería, el comercio y la agricultura basada en el cultivo de caña, ganadería y explotación de oro, la zona se caracteriza por un alto grado de concentración de la propiedad de la tierra (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE), 2022).

La Figura 2 muestra la cuenca del río Nús con punto de aforo en la estación de nivel CARAMANTA [23087160] del IDEAM. En el panel derecho se observa la ubicación de la cuenca respecto al país, resaltando el departamento de Antioquia con color verde. En este mismo panel se muestra la cuenca con un cuadro rojo y su ubicación respecto al departamento.

Figura 2*Cuenca del río Nús e instrumentación del SAMA*

2.2.1 Régimen de precipitación y temperatura media

Según los registros históricos del IDEAM se calculó el régimen de precipitación a partir de 6 estaciones (Tabla 2) ponderando los promedios mensuales multianuales en el periodo 01-01-2000 y 25-12-2022 mediante el método de polígonos de Thiessen, encontrando que el régimen es bimodal (Figura 3, línea negra), los picos de máxima precipitación corresponden a los meses de abril-mayo-junio y septiembre-octubre-noviembre, siendo el periodo de junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero los picos de baja precipitación. El máximo de precipitación ocurre en mayo y el mínimo en enero, coincidiendo con lo reportado en literatura para las cuencas ubicadas en la región central de Colombia (Poveda et al., 2005). Finalmente, la cuenca se caracteriza por poseer una temperatura media que varía entre los 18 y 27 grados centígrados.

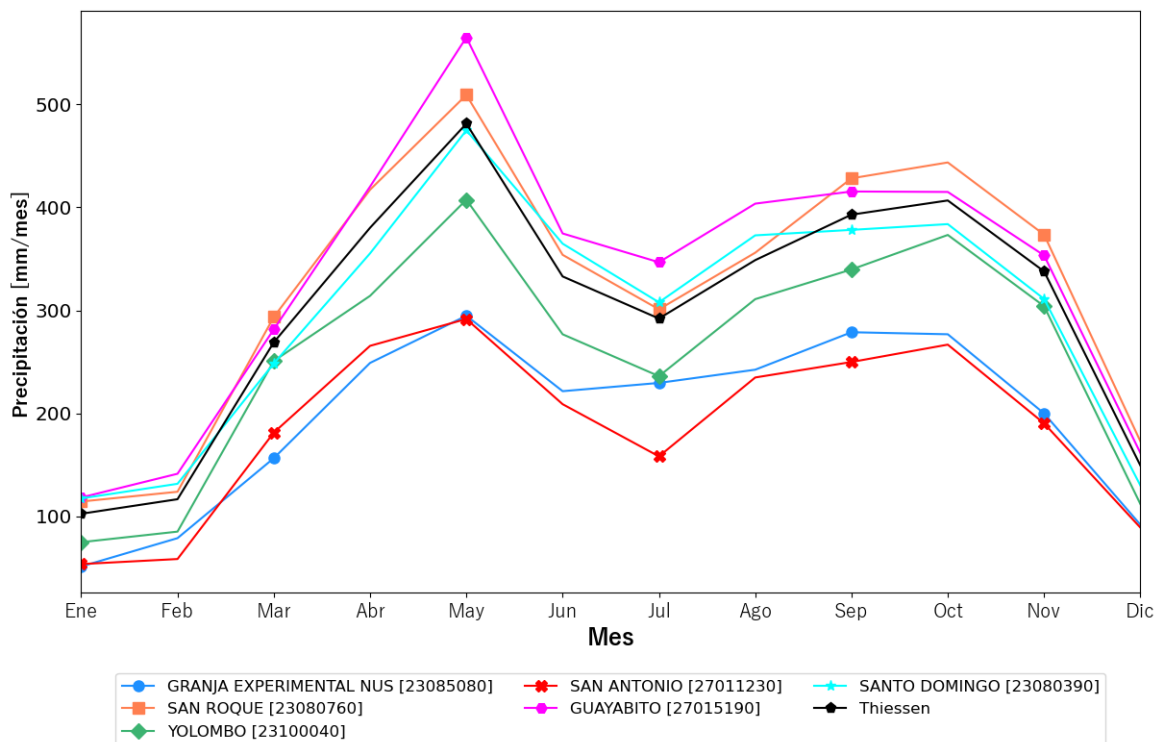
Tabla 2

Estaciones IDEAM utilizadas para la caracterización del régimen de precipitación de la cuenca del río Nús

Nombre	Código	Periodo de registro	Tipo estación
Granja experimental	23085080	2000-01-01 – 2022-12-25	Climática principal
San Roque	23080760	2000-01-01 – 2022-12-13	Pluviométrica
Yolombó	23100040	2000-01-01 – 2022-11-30	Pluviométrica
San Antonio	27011230	2000-02-04 – 2022-12-25	Pluviométrica
Guayabito	27015190	2000-01-01 – 2022-12-25	Climática principal
Santo Domingo	23080390	2000-01-02 – 2022-11-30	Pluviométrica

Figura 3

Régimen de precipitación de las estaciones IDEAM cercanas a la cuenca del río Nús



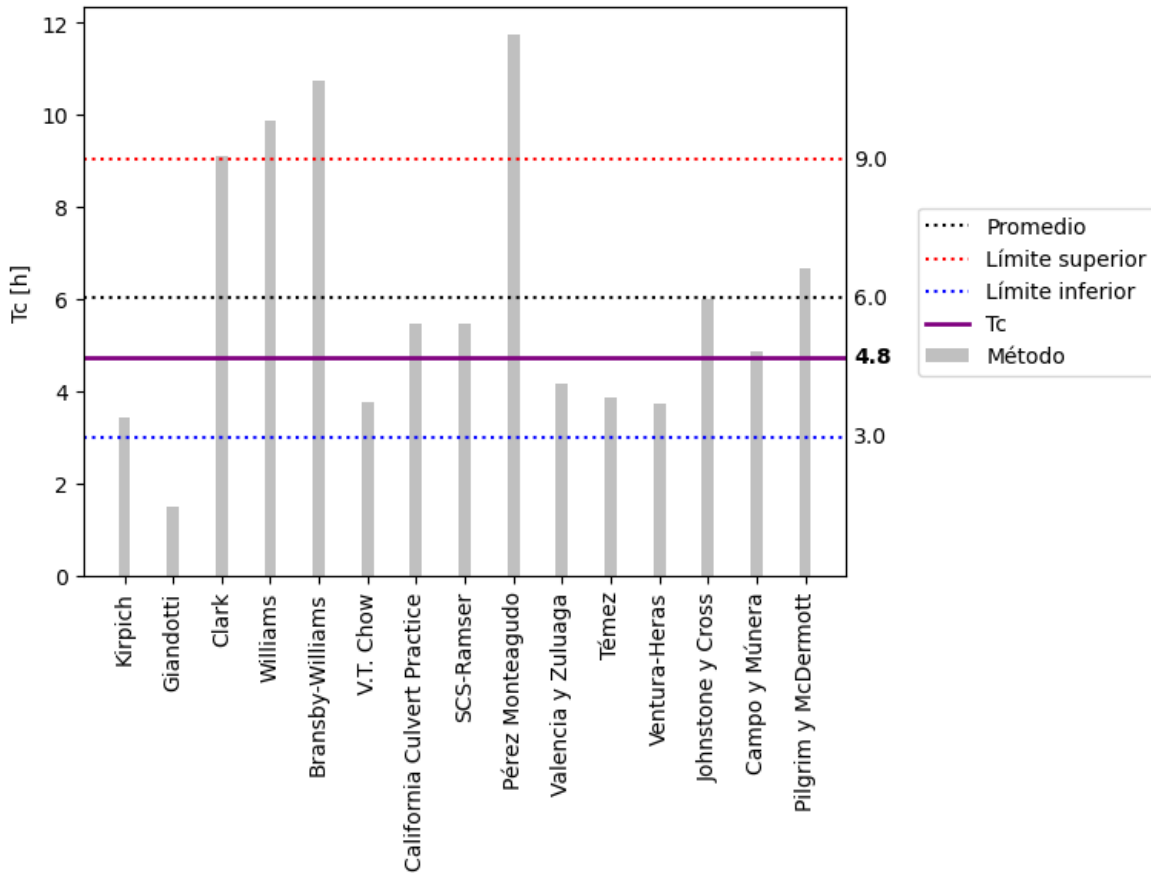
2.2.2 *Parámetros morfométricos*

El trazado de la cuenca se realizó tomando como punto de aforo la estación limnigráfica del IDEAM CARAMANTA [23087160] definiendo un área de 304,9 km². Realizando un análisis morfométrico de la cuenca se encuentra que esta es una cuenca ligeramente alargada oval-oblonga a rectangular-oblonga que posee relieve montañoso y pendiente fuerte. El cauce principal tiene una pendiente promedio de 8,6 % y se encuentra entre los 2075,3 y 806,8 m.s.n.m. (Tabla 3). A partir de los parámetros morfométricos se calculó el tiempo de concentración de la cuenca, siendo igual a 4,8 horas (Figura 4). En este trabajo se aplicaron los métodos Kirpich, Giandotti, Clark, Williams, Bransby-Williams, V.T. Chow, entre otros para calcular el tiempo de concentración de la cuenca como el promedio de los valores del tiempo de concentración de los diferentes métodos empleados sin considerar los valores extremos mayores o menores al tiempo de concentración promedio de todos los métodos más o menos la desviación estándar.

Tabla 3

Parámetros morfométricos de la cuenca del río Nús

Características relativas a la forma			
Área de la cuenca	A	304,9	km ²
Perímetro de la cuenca	P	138,8	km
Longitud de la cuenca	L	34,1	km
Ancho de la cuenca	W	9,0	km
Longitud del cauce principal	L _c	49,5	km
Parámetros de forma			
Factor de forma de Horton	K _f	0,3	Cuenca alargada
Coefficiente de compacidad	K _c	2,2	Cuenca oval oblonga a rectangular oblonga
Relación de elongación	R _e	0,6	Cuenca con bajo relieve
Índice de alargamiento	IA	1,8	Cuenca alargada
Parámetros relativos al relieve			
Pendiente media de la cuenca	S	35,1	%
Pendiente media del cauce principal	S _c	8,6	%
Elevación promedio	E	1353,3	m.s.n.m.
Cota mayor del cauce principal	H _M	2075,3	m.s.n.m.
Cota menor del cauce principal	H _m	806,8	m.s.n.m.

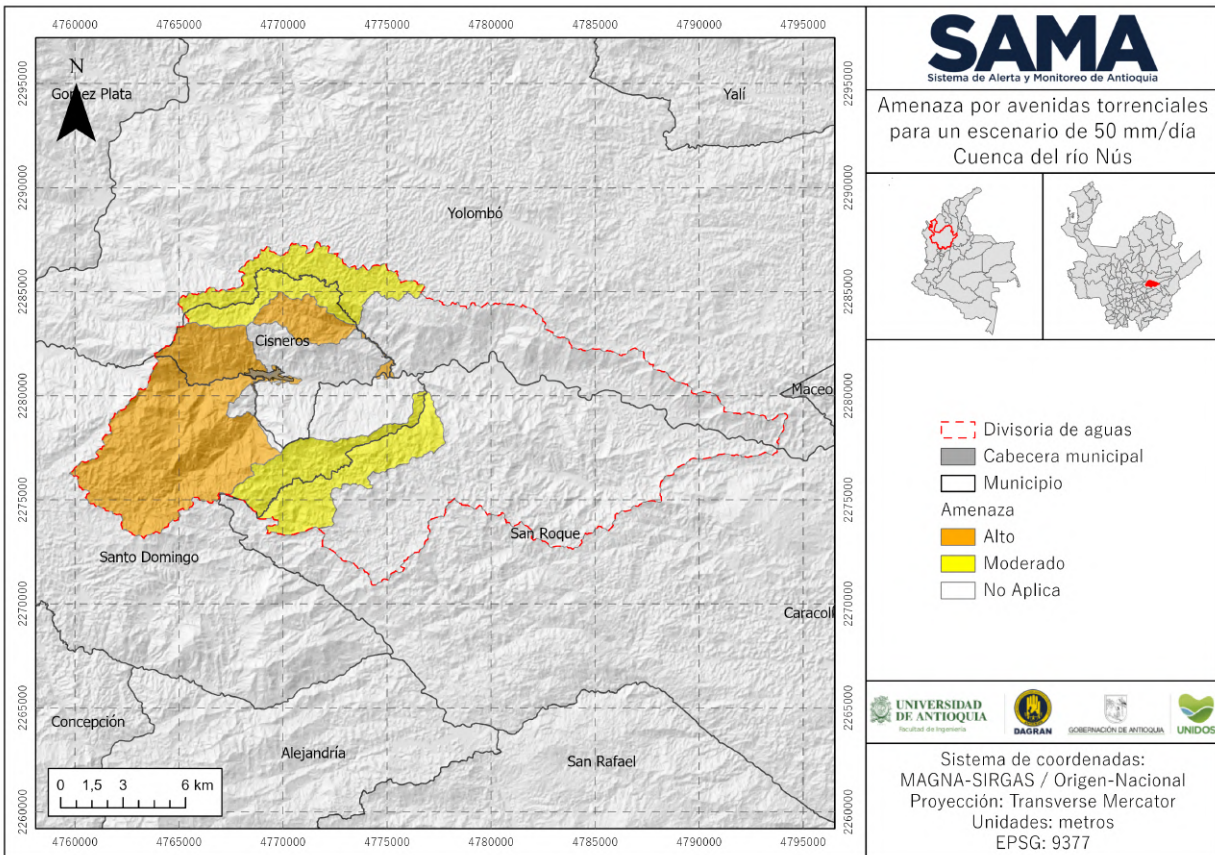
Figura 4*Tiempo de concentración de la cuenca del río Nús*

2.2.3 Caracterización de la amenaza en la cuenca del río Nús

De acuerdo con el estudio de avenidas torrenciales desarrollado en el departamento de Antioquia en el año 2018 se determinó que la parte alta de la cuenca posee una amenaza alta y moderada a la ocurrencia de avenidas torrenciales con condiciones de lluvia iguales o superiores a 50 mm/día (Figura 5) (Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (UNAL), 2018).

Figura 5

Mapa de amenaza por avenidas torrenciales para un escenario de 50 mm/día para la cuenca del río Nús



Nota. Tomado y adaptado de UNAL (2018).

2.2.4 SAMA en la cuenca del río Nús

La instrumentación de esta cuenca cuenta con presencia de la red IDEAM y fue fortalecida con tres (3) pluviómetros, dos (2) sensores de nivel y una (1) alarma comunitaria con estructura SAT por parte del SAMA desde el año 2020 (Figura 2). Los sensores de nivel miden a una resolución temporal de un minuto, uno monitorea el río Nús a la altura del municipio de Cisneros y el otro la quebrada San Germán, la cual atraviesa el casco urbano de Cisneros. Los pluviómetros miden la precipitación en resolución temporal de 5 minutos ubicándose en Cisneros y en el municipio de Santo Domingo.

2.3 Criterios de selección de la cuenca del río Penderisco

A partir del histórico de eventos se identificaron varias comunidades vulnerables que han sido afectadas por las dinámicas del río Penderisco y sus afluentes (Tabla 4). Por lo cual, el SAMA priorizó la instrumentación de dicha cuenca realizándose comisiones para la identificación de los puntos óptimos de acuerdo con los criterios mencionados en el apartado 2.1 de este documento.

Tabla 4

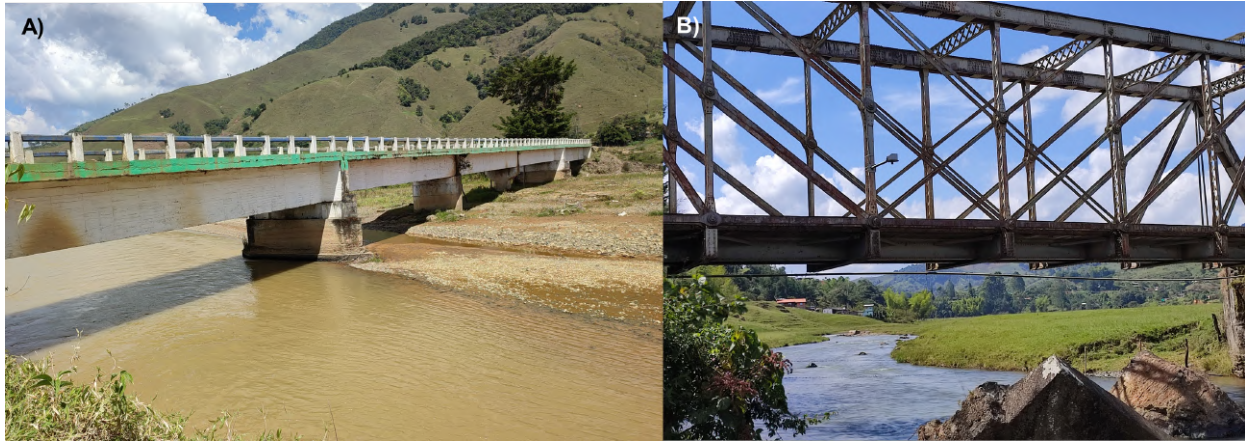
Eventos hidrometeorológicos históricos en el municipio de Urrao

Ubicación	Tipo(s) de evento(s)	Fuente	Observaciones
Zona urbana y rural	Inundación	DAGRAN	27/02/2008
Zona urbana	Avenida torrencial	DAGRAN	14/07/2015
Zona urbana barrios Aleu y 20 de julio	Inundación	UNGRD	18/09/2017
Zona urbana	Inundación	UNGRD/DAGRAN	20/05/2017
Zona urbana barrios Aleu y 20 de julio	Inundación	UNGRD	4/05/2018
Zona rural	Inundación	UNGRD	14/11/2020
Zona rural	Avenida torrencial	UNGRD	22/10/2020

En la Figura 6 se observa que los tramos de instalación seleccionados presentan un lecho no rocoso, un flujo aproximadamente laminar y un tramo relativamente recto. Sin embargo, debido a problemas estructurales en el puente, el sensor de nivel inicialmente instalado sobre el río Penderisco tuvo que ser removido por lo que actualmente se encuentra en proceso de reubicación.

Figura 6

Punto de instalación del sensor de nivel sobre A) el río Penderisco y B) el río Pabón



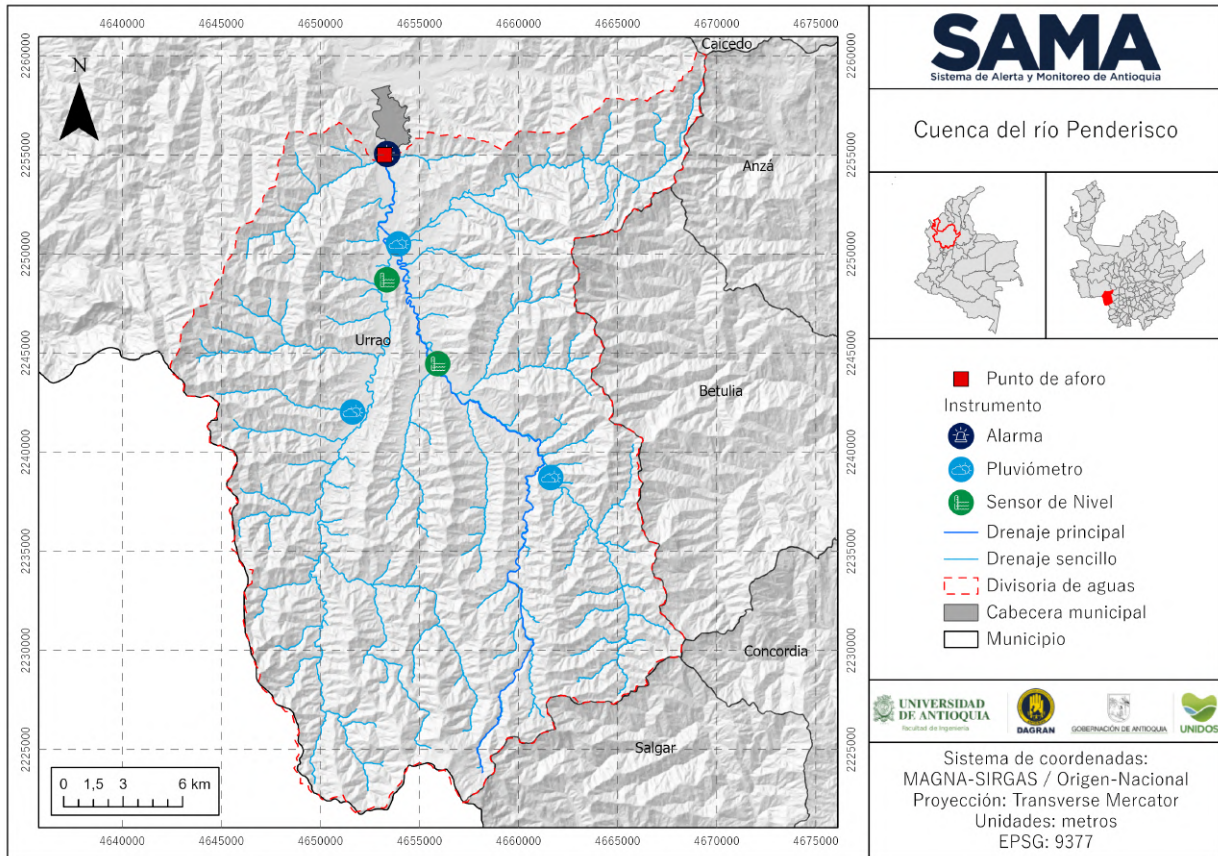
2.4 Cuenca del río Penderisco

El río Penderisco nace entre los 2.350 y 3.250 m.s.n.m. en el Cerro Plateado, y en las veredas Llano Grande, Penderisco Arriba, San Joaquín, Santa Ana y Santa Isabel del municipio de Urrao. Las aguas que escurren desde la parte alta del Cerro Plateado y las veredas mencionadas forman el cauce principal del río, el cual después de recorrer 96,41 km y haber drenado un área de 1609,25 km², desemboca en el río Murri a una altura de 350 m.s.n.m. Los principales afluentes del río Penderisco son los ríos Nendo, Orobugo, Pabón, Urrao y Encarnación (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015).

La Figura 7 muestra la cuenca del río Penderisco con punto de aforo en la estación LA MAGDALENA - AUT [11077020] del IDEAM. En el panel derecho se observa la ubicación de la cuenca respecto al país, resaltando el departamento de Antioquia con color verde. En este mismo panel se muestra la localización de la cuenca respecto al departamento con un cuadro rojo.

2.4.1 Régimen de precipitación y temperatura media

La cuenca presenta una temperatura promedio con valores entre 14 y 22 °C y un régimen de precipitación bimodal de acuerdo con los registros históricos de seis (6) estaciones del

Figura 7*Cuenca del río Penderisco e instrumentación del SAMA*

IDEAM (Tabla 5) en la zona de influencia de la cuenca (Figura 8). Los promedios mensuales multianuales fueron calculados a partir del periodo común 01-01-1990 y 25-12-2022 mediante el método de polígonos de Thiessen. Los picos de máxima precipitación corresponden a los periodos de abril-mayo-junio y septiembre-octubre-noviembre siendo mayo el mes con mayor pluviosidad, mientras que en los periodos de junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero se presentan los picos de menor precipitación, siendo enero el mes con menor precipitación.

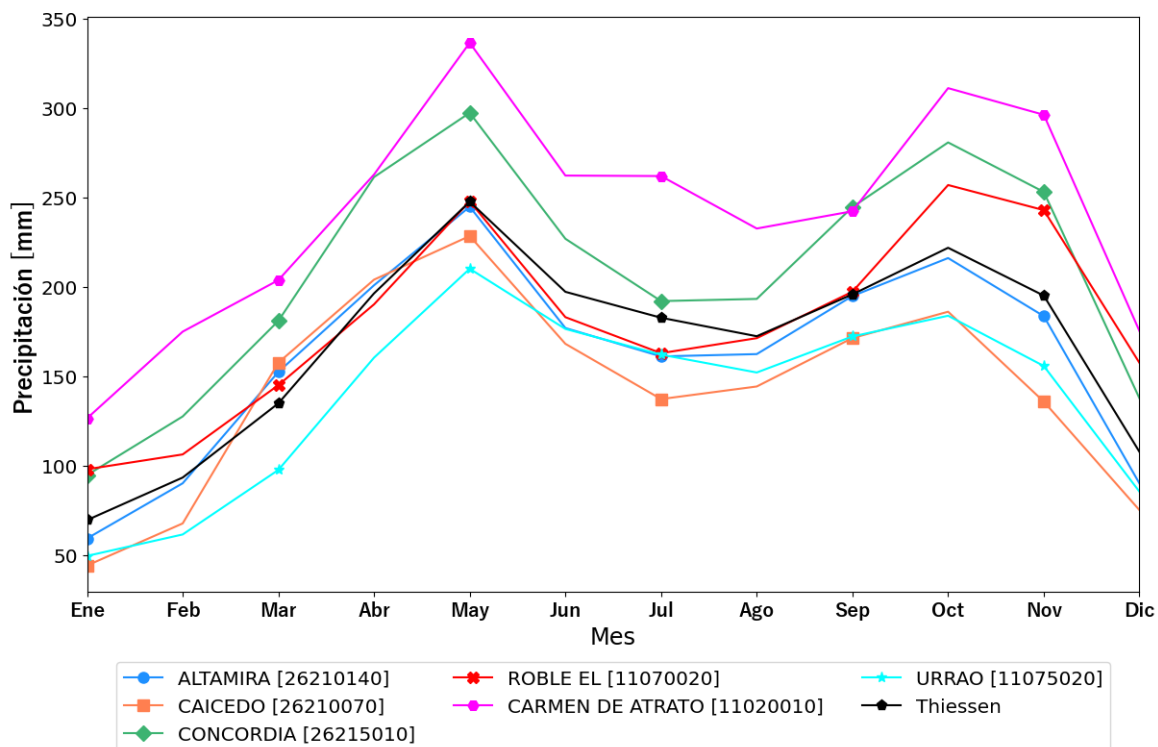
Tabla 5

Estaciones IDEAM utilizadas para la caracterización del régimen de precipitación de la cuenca del río Penderisco

Nombre	Código	Periodo de registro	Tipo estación
Altamira	26210140	1990-01-01 – 2021-11-16	Pluviométrica
Caicedo	26210070	1990-01-01 – 2022-07-20	Pluviométrica
Carmen de Atrato	11020010	1990-01-01 – 2022-11-30	Pluviométrica
Concordia	26215010	1990-01-01 – 2022-11-30	Climática Ordinaria
El Roble	11070020	1990-01-01 – 2021-10-31	Pluviométrica
Urrao	11075020	1990-01-01 – 2022-12-25	Climática Ordinaria

Figura 8

Régimen de precipitación de las estaciones IDEAM cercanas a la cuenca del río Penderisco



2.4.2 *Parámetros morfométricos*

Según el análisis morfométrico (Tabla 6), la cuenca del río Penderisco con punto de aforo en la estación limnigráfica del IDEAM LA MAGDALENA - AUT [11077020] cuenta con un área de 636,4 km². La forma, es alargada y oval-oblonga a rectangular-oblonga, el relieve es bajo. El cauce principal tiene una elevación máxima de 3.020 m.s.n.m., una elevación mínima de 1.806 m.s.n.m. y una pendiente del 2,6 %. De acuerdo con esta caracterización y homólogo a la cuenca del río Nús, se aplicaron 15 métodos de estimación del tiempo de concentración de la cuenca encontrando un promedio de 6,668 horas (Figura 9).

Tabla 6

Parámetros morfométricos de la cuenca del río Penderisco

Características relativas a la forma			
Área de la cuenca	A	636,4	km ²
Perímetro de la cuenca	P	138,5	km
Longitud de la cuenca	L	33,0	km
Ancho de la cuenca	W	19,3	km
Longitud del cauce principal	L _c	46,8	km
Parámetros de forma			
Factor de forma de Horton	K _f	0,6	Cuenca alargada
Coefficiente de compacidad	K _c	1,5	Cuenca oval redonda a oval oblonga
Relación de elongación	R _e	0,9	Cuenca con bajo relieve
Índice de alargamiento	IA	2,4	Cuenca alargada
Parámetros relativos al relieve			
Pendiente media de la cuenca	S	47,1	%
Pendiente media del cauce principal	S _c	2,6	%
Elevación promedio	E	2307,8	m.s.n.m.
Cota mayor del cauce principal	H _M	3019,9	m.s.n.m.
Cota menor del cauce principal	H _m	1806,0	m.s.n.m.

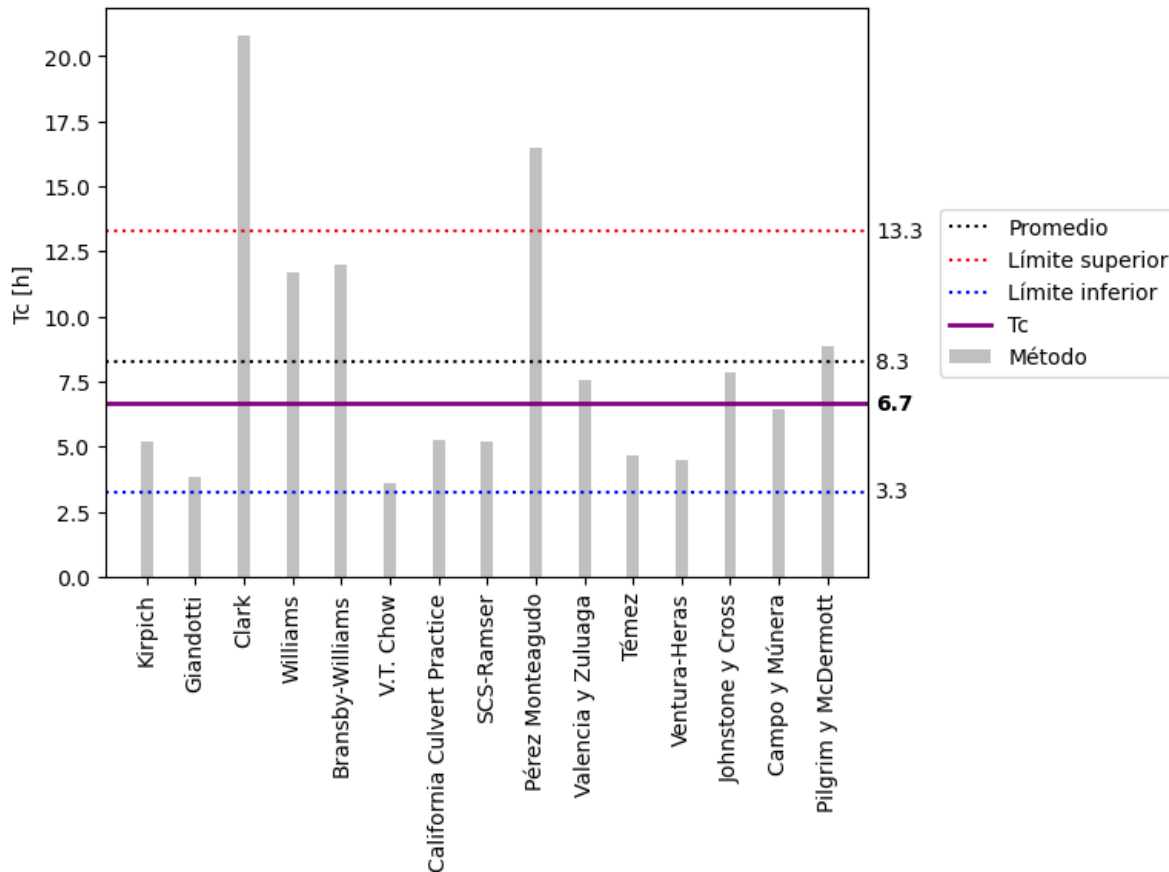
2.4.3 *Caracterización de la amenaza en la cuenca del río Penderisco*

Según UNAL (2018) la parte alta de la cuenca y las zonas de inundación de los ríos Penderisco y Pabón poseen una amenaza alta, mientras que en la ladera oriental del río

Penderisco, la ladera occidental del río Pabón y la zona centro-sur de la cuenca presentan una amenaza moderada a la ocurrencia de avenidas torrenciales con condiciones de lluvia iguales o superiores a 50 mm/día (Figura 10).

Figura 9

Tiempo de concentración de la cuenca del río Penderisco

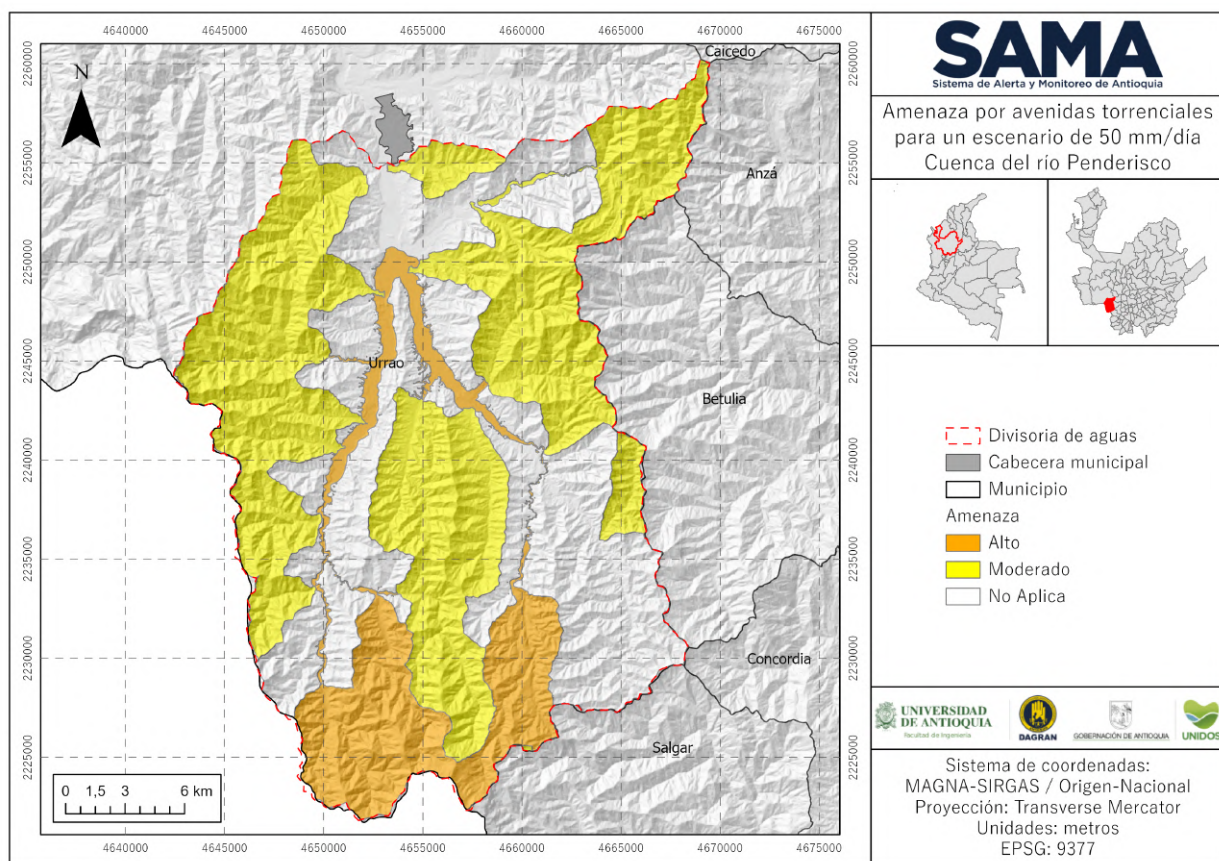


2.4.4 SAMA en la cuenca del río Penderisco

La cuenca se encuentra instrumentada por el SAMA desde el año 2020, contando con dos (2) sensores de nivel instalados en los ríos Penderisco (en proceso de reubicación) y Pabón, que registran datos en una escala temporal de un minuto, tres (3) pluviómetros automáticos que miden la precipitación con resolución temporal de 5 minutos distribuidos en la parte alta, media y baja de la cuenca y una alarma ubicada en el barrio Las Vegas del casco urbano del municipio de Urrao (Figura 7).

Figura 10

Mapa de amenaza por avenidas torrenciales para un escenario de 50 mm/día para la cuenca del río Penderisco



Nota. Tomado y adaptado de UNAL (2018).

3 Marco teórico

El monitoreo de las variables hidrológicas históricamente ha tenido un enfoque de seguridad, abastecimiento y manejo del recurso hídrico. A lo largo de los años se ha evidenciado una estructura clara enfocada a la gestión integral del recurso hídrico, la cual plantea la gestión y el aprovechamiento coordinado del agua, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales a largo plazo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

En el país existen varias entidades que se encargan del monitoreo hidrológico entre las cuales se encuentra el IDEAM, que se establece mediante la ley 99 de 1993 y entre sus funciones se encuentra monitorear y generar conocimiento sobre el medio natural para asesorar al Ministerio del Medio Ambiente, al SINA y a la comunidad en general. Una de sus principales acciones es la operación y mantenimiento de la red de observaciones y mediciones hidrometeorológicas conformada por 2741 estaciones ubicadas en todo el territorio nacional monitoreando precipitación, temperatura, humedad, brillo solar, evaporación, velocidad y dirección del viento, entre otras variables en cuanto a las estaciones climatológicas, y nivel, caudal, concentración de sedimentos, perfil transversal, entre otras variables concernientes a las estaciones hidrológicas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2019).

En el departamento de interés para este estudio, además del IDEAM, se destaca el Programa Integral Red Agua (PIRAGUA) el cual integra una red automática de monitoreo del recurso hídrico y la red social de monitoreo más grande del país. Piragua, genera información sobre gestión socioambiental desde el año 2011, involucrando a las comunidades en las que ha formado una cultura de la información a través de redes sociales de monitoreo; promueve y desarrolla sistemas de información del agua, construidos, implementados y operados por las comunidades en los 80 municipios de la jurisdicción de Corantioquia (Programa Integral Red Agua (PIRAGUA), sf).

La importancia de implementar y mantener en funcionamiento una red de monitoreo viene directamente relacionada a la frecuencia de los eventos. En Antioquia, entre 2000 y 2017 se registraron en el departamento 479 eventos de desastres asociados a inundaciones en los cuales se evidenciaron afectaciones directas a la población humana, 74 decesos, 52 heridos y 30 desaparecidos, además 731 casas fueron destruidas, 60355 sufrieron algún tipo de daño, 4989 personas fueron reubicadas y 338 fueron evacuadas, de acuerdo con los registros de la

plataforma <https://www.desinventar.net/>. Además, una fracción considerable del departamento de Antioquia se encuentra bajo amenaza moderada, alta y muy alta de ocurrencia de avenidas torrenciales para un escenario de lluvia de 50 mm/día, junto con una alta y muy alta vulnerabilidad ante dichos eventos (UNAL, 2018).

La gestión del riesgo de desastres se define como un proceso social para el conocimiento y la reducción del riesgo y el manejo de desastres y se basa en 3 conceptos para evaluar las condiciones de una población o lugar geográfico, la vulnerabilidad, la amenaza y el riesgo. La vulnerabilidad es la susceptibilidad o fragilidad física, económica, ambiental, entre otros, que tiene una comunidad de sufrir efectos adversos ante una situación o un evento físico peligroso que se desencadene. La amenaza se define como el peligro inminente de un acontecimiento que no ha sucedido pero que potencialmente puede ocurrir y afectar a una o varias personas. El riesgo es la probabilidad de que una amenaza cause daños estructurales, naturales o socioeconómicos (Colombia. Congreso de la República., 2012; Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN), 2022).

A través de la hidrología es posible tener un mejor entendimiento de los procesos que engloban el ciclo hidrológico y su comportamiento dentro del sistema natural, lo que permite por tanto, generar estrategias encaminadas a la gestión de este recurso. De igual manera, el conocimiento generado a través de la aplicación de la hidrología en conjunto con otras disciplinas permite plantear metodologías enfocadas a comprender y actuar ante posibles amenazas de origen hidrológico y cómo estas amenazas en conjunto con el grado de vulnerabilidad que pueda presentar una comunidad generan el riesgo asociado a eventos hidrológicos.

El monitoreo permanente de las variables hidrológicas permite simular eventos futuros y establecer umbrales a partir de los cuales informar con antelación a las entidades públicas y a los tomadores de decisiones (alcaldías, consejos municipales de gestión del riesgo bomberos, etc.) alertando a la población vulnerable con el fin de evitar pérdidas y/o lesiones humanas. Lo anterior constituye el objetivo principal de un SAT, el cual fortalece tecnológicamente la vigilancia, previsión y predicción de amenazas, evaluación de los riesgos de desastres, sistemas y procesos de comunicación y preparación que permite a las partes involucradas adoptar las medidas oportunas para reducir los riesgos ante desastres con antelación a sucesos peligrosos (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2016).

En Colombia, los SAT que se destacan debido a que cumplen los 4 requisitos para que un SAT sea efectivo son: el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá

(SIATA) y el SAT de Bogotá, los cuales monitorean y pronostican fenómenos naturales que alteren las condiciones ambientales o que puedan generar riesgos a la población fortaleciendo la gestión del riesgo en el territorio (Domínguez y Lozano, 2014; Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), 2010). Es importante destacar que los SAT de mejor tecnificación y desempeño del país están enfocados en las ciudades principales y no se evidencia la existencia de SAT orientado a las zonas rurales (Domínguez y Lozano, 2014), las cuales son las más vulnerables y con menor capacidad de respuesta.

El fortalecimiento de un SAT inicia con un enfoque en el monitoreo del tiempo atmosférico y conocimiento del riesgo. Para llevar a cabo esta función es necesario identificar qué condiciones hidrometeorológicas pueden desencadenar eventos de inundaciones, crecientes súbitas y avenidas torrenciales. Además, la información recolectada a través del monitoreo se convierte en insumo fundamental a la hora de simular los caudales de las corrientes a las cuales se les atribuyen estos sucesos y al analizar la influencia del CC y la VC sobre el régimen de caudales.

La implementación de un modelo hidrológico lluvia – escorrentía, el cual puede representar los procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca hidrográfica, es una herramienta sumamente importante para el estudio de eventos de riesgo como los mencionados anteriormente, además, dicha implementación es fundamental para realizar los pronósticos y propagación de la alertas que puedan dar espacio a acciones de mitigación y respuesta a las autoridades competentes (Erasun et al., 2019).

Actualmente, existe una amplia variedad de modelos hidrológicos por lo que la elección de uno u otro estará condicionada a las necesidades del modelador y los requerimientos específicos según la cuenca hidrográfica a modelar o la disponibilidad de información. En este estudio, en particular, se hizo uso de los modelos GR4J y HEC-HMS, con los cuales se realizó la simulación de caudales máximos/medios y la simulación de crecientes respectivamente.

GR4J es un modelo hidrológico empírico de lluvia – escorrentía, conceptual y agregado, que funciona con 4 parámetros de resolución diaria (Ver Tabla 8) y se caracteriza por su simplicidad, bajos requisitos de datos y estructura parsimoniosa. Este modelo se ha utilizado para el modelado de escorrentía y la previsión de crecientes (Mohammadi et al., 2022), además, en la literatura se encuentra que se ha empleado para la simulación de caudales máximos en conjunto con efectos del cambio climático sobre el régimen de caudales dando un rendimiento satisfactorio (Tian et al., 2013; Traore et al., 2014)

HEC-HMS, es un modelo diseñado para simular procesos hidrológicos en sistemas de cuencas dendríticas. Este modelo matemático simula procesos de precipitación – escorrentía y procesos de enrutamiento en cuencas naturales o controladas. El modelo ha sido utilizado con diferentes objetivos de estudio, destacándose con gran importancia la predicción de eventos de inundación, un ejemplo de esta aplicación se evidencia en el estudio a escala regional para la cuenca del río San Antonio en Estados Unidos, en el cual se demostró la capacidad del modelo para realizar estudios hidrológicos en cuencas de gran tamaño. De igual manera, otros estudios como Oleyiblo y Li (2010) y Ramly y Tahir (2016) exponen la capacidad del modelo para predecir caudales máximos con precisión determinándose que el modelo es apropiado para la predicción de inundaciones.

Asimismo, es importante tener en cuenta las proyecciones de CC, debido a que el norte de Suramérica, región en la que se encuentra Colombia, es una de las más vulnerables ante este (Arias et al., 2021). Particularmente, en este documento se evaluaron los escenarios de CC, conocidos como Representative Concentration Pathways (RCP) y Shared Socioeconomic Pathways (SSP), RCP8,5 y SSP585. El escenario RCP8,5, desarrollado por el experimento CMIP5 y sujeto al Experimento Regional Coordinado de Reducción de Escala del Clima (CORDEX por sus siglas en inglés), se desarrolla bajo la narrativa de alta población y un crecimiento de ingresos relativamente lento con tasas modestas de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética, lo que lleva a largo plazo a una alta demanda de energía y emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas de cambio climático. El escenario RCP8.5 es la ruta de mayor concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Por su parte el escenario SSP585, desarrollado por el experimento CMIP6, es una actualización del escenario RCP8.5 de CMIP5, ahora combinado con razones socioeconómicas y un nuevo forzamiento radiativo (O'Neill et al., 2016; Riahi et al., 2011).

4 Metodología

Para el desarrollo de este trabajo fueron necesarios los registros de precipitación y caudal in-situ con resolución temporal diaria y/o horaria (según disponibilidad), evapotranspiración potencial, modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en ingles), la curva de intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la estación Guayabito listada en la Tabla 2 de la sección 2.2.1 del presente documento y las proyecciones de precipitación y temperatura para finales de siglo obtenidas de los resultados publicados por los productos CMIP5, CMIP6 y CORDEX.

4.1 Recopilación de información

4.1.1 *Precipitación y caudales in-situ*

Como se mencionó anteriormente, el IDEAM es la entidad responsable del monitoreo de variables hidrometeorológicas en Colombia, incluyendo la medición de precipitación y caudal. A partir del catálogo de estaciones, y haciendo uso de sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en ingles), se seleccionaron aquellas estaciones espacialmente cercanas a las cuencas de los ríos Nús y Penderisco, dentro y fuera de las divisorias, con mediciones de precipitación para un periodo común diferenciado por cada cuenca (Figura 11, Tabla 7). Los datos fueron descargados de la plataforma para la obtención de datos y atención al ciudadano del IDEAM (disponibles aquí: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>) hasta la fecha más reciente.

La construcción del hietograma representativo para la cuenca del río Nús ingresado al modelo GR4J se basó en las estaciones: Granja Experimental, Guayabito, San Antonio, San Roque, Santo Domingo y Yolombo. Para la cuenca del río Penderisco se utilizaron las estaciones Altamira, Caicedo, Carmen de Atrato, Concordia, El Roble y Urrao. Las estaciones adicionales contempladas en la Tabla 7 se usaron únicamente para reconstruir las series de precipitación en los periodos con datos faltantes.

Al realizar el análisis exploratorio de las series obtenidas se observaron ventanas de tiempo importantes sin datos, faltantes, los cuales representan inconvenientes ya que en estudios hidrológicos es necesario contar con series de datos continuas en el tiempo, por lo cual fue necesario estimar los valores de precipitación para estos vacíos. Las series incompletas

Figura 11

Estaciones IDEAM utilizadas para simulación y reconstrucción de series de datos por el método de la precipitación normal para la cuenca de los ríos Nús (arriba) y Penderisco (abajo)

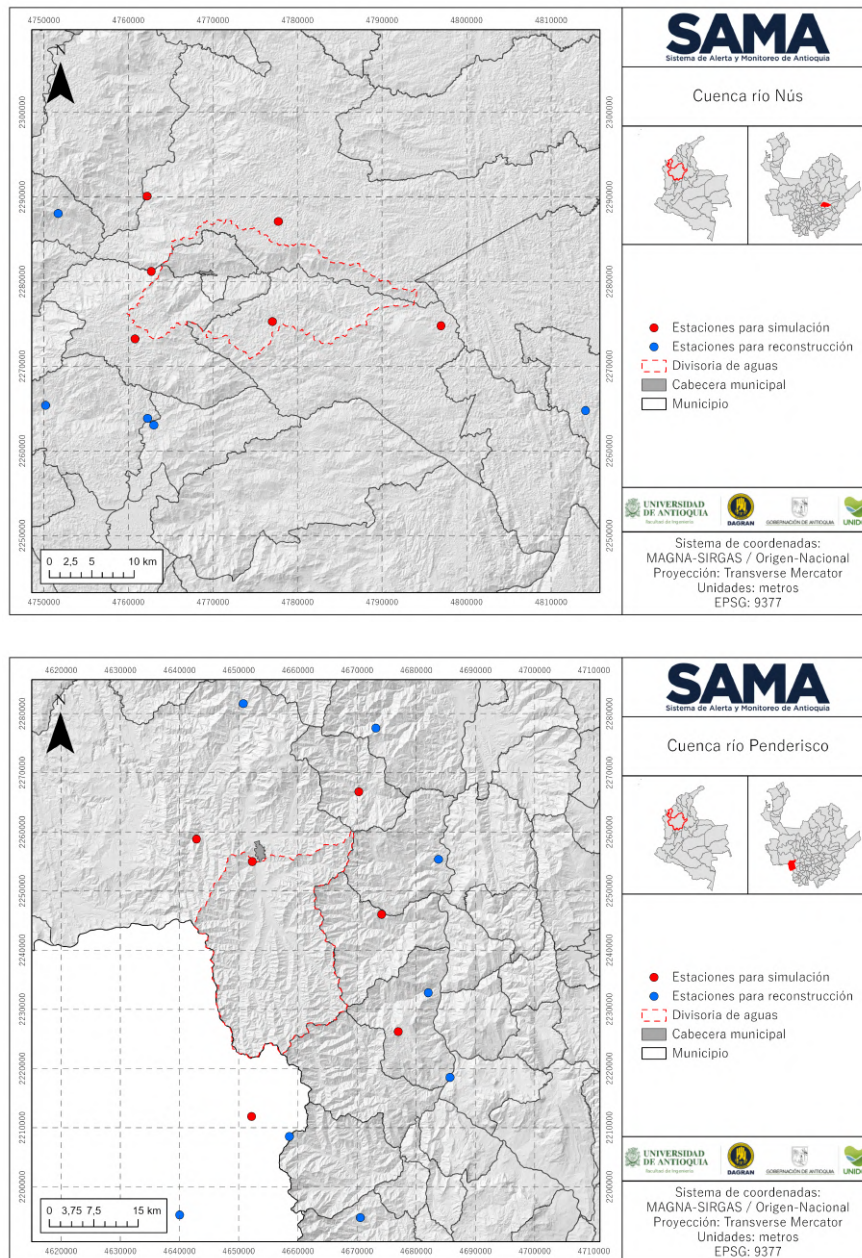


Tabla 7

Estaciones empleadas para la reconstrucción de las series de precipitación sobre las cuencas de los ríos Nús y Penderisco

Nombre	Longitud	Latitud	% datos faltantes
Estaciones cuenca río Nús			
ALEJANDRIA [23085030]	-75,143389	6,37625	0,024
CONCEPCION [23080740]	-75,259167	6,396944	0,024
GRANJA EXPERIMENTAL EL NUS - AUT [23085080]	-74,836694	6,483583	13,642
GUAYABITO [27015190]	-75,14675	6,540389	4,154
PRESA SAN LORENZO [23080940]	-74,996778	6,384583	15,595
SAN ANTONIO [27011230]	-75,151667	6,620833	5,13
SAN PABLO [27010840]	-75,246528	6,602	3,571
SAN ROQUE [23080760]	-75,017	6,4875	0,059
SANTO DOMINGO [23080390]	-75,163806	6,468306	3,404
VIRGINIAS [23090020]	-74,681806	6,393556	1,547
YOLOMBO [23100040]	-75,010917	6,594278	3,845
Estaciones cuenca río Penderisco			
ALTAMIRA [26210140]	-75,9449	6,2188	3,918
ANZA [26210090]	-75,8593	6,303139	0,050
BETANIA-LAS GUACAS [26190090]	-75,9755	5,755	0,324
BOLOMBOLO [26200130]	-75,8374	5,9681	0,423
CAICEDO [26210070]	-75,9818	6,4049	4,159
CARMEN DE ATRATO [11020010]	-76,1421	5,908528	0,291
CLARITA LA [11070030]	-76,1586	6,539444	2,880
CONCORDIA [26215010]	-75,9195	6,039556	3,611
GUASABRA [26210130]	-75,9558	6,503333	1,494
HERRADURA LA [26210080]	-75,874	6,099222	1,436
MANSA LA [11025010]	-76,0843	5,878306	1,868
PINON EL [11020050]	-76,2509	5,757667	6,251
ROBLE EL [11070020]	-76,2291	6,332052	3,544
URRAO [11075020]	-76,1433	6,298306	11,015

son un escenario relativamente común reportado en literatura, frecuentemente se indican diferentes métodos para completar series de precipitación. Particularmente en este estudio se implementó y adaptó el método de la precipitación normal descrito por la Ecuación 1:

$$P_x = \frac{1}{n} \left(P_1 \frac{N_x}{N_1} + P_2 \frac{N_x}{N_2} + \dots + P_n \frac{N_x}{N_n} \right) \quad (1)$$

Siendo P_x el dato faltante de la estación x , n el número de estaciones con datos de registro continuo cercanos a la estación x , N_x es la precipitación media mensual multianual de la estación x , N_1 a N_n la precipitación media mensual multianual de las estaciones cercanas y P_1 a P_n la precipitación durante el periodo de tiempo a completar (Monsalve Sáenz, 1999).

Una vez realizada la reconstrucción de la serie de precipitación, fue necesario espacializar los datos sobre la cuenca y estimar una serie de precipitación representativa; para lograrlo se procedió a implementar el método de los polígonos de Thiessen que consiste en ponderar el registro de las estaciones por un factor corresponde al área de influencia de la estación sobre el área total de la cuenca. Para definir el área de influencia de cada estación, se identifican espacialmente las estaciones que se van a usar en el análisis y se unen trazando líneas rectas entre cada estación con las dos (2) más cercanas formando triángulos; a estas rectas se les trazó la mediatriz proyectándose hasta tocar la divisoria de aguas. Así, las áreas contenidas entre mediatrices y la divisoria de la cuenca son las que definen los polígonos de influencia para cada estación. El cálculo de la precipitación media se realiza empleando la Ecuación 2, así:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A_T} \quad (2)$$

Donde n es el número de estaciones seleccionadas, A_T es el área total de la cuenca, P_i es la precipitación registrada por la estación i y A_i es el área de influencia de la estación i (Vélez Otálvaro, 2000).

Los datos faltantes de las series de caudal se abordaron mediante: a) media móvil en datos faltantes aleatorios y no consecutivos y b) reconstrucción de caudal generados por modelos de lluvia-escorrentía, el cual era uno de los objetivos de este trabajo. Los registros de caudal se utilizaron para evaluar los rendimientos en el proceso de calibración y validación de los modelos. Las estaciones hidrológicas seleccionadas para este estudio fueron Caramanta [23087160] para la cuenca del río Nús y La Magdalena-AUT [11077020] para la cuenca del

río Penderisco. Los métodos de evaluación de rendimiento se encuentran especificados en el título 5.4. El procesamiento de estos datos se realizó con el lenguaje de programación Python 3.

4.1.2 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se define como el límite máximo de la evapotranspiración que ocurriría sobre un área específica suponiendo que la disponibilidad del recurso es ilimitada tanto para las plantas como para el suelo. Esta variable se definió con el objeto de estimar las pérdidas máximas por evaporación para una cuenca. La evapotranspiración es un componente importante del ciclo hidrológico y uno de los más difíciles de cuantificar al depender de múltiples factores condicionantes. En este trabajo se hizo uso de la ecuación propuesta por Cenicafé, estimada específicamente para cuencas hidrográficas sobre la región Andina que se encuentren entre los 170 y 3700 m.s.n.m., restricciones que cumplen las cuencas de interés de este estudio (Jaramillo Robledo, 2007; Vélez Otálvaro, 2000). La expresión matemática para la ETP según Cenicafé, es:

$$ETP \left(\frac{mm}{día} \right) = 4,37 \exp(-0,0002) \cdot altitud \quad (3)$$

Donde la altitud está dada en m.s.n.m. Para el presente estudio este valor se tomó como la altitud promedio de las cuencas.

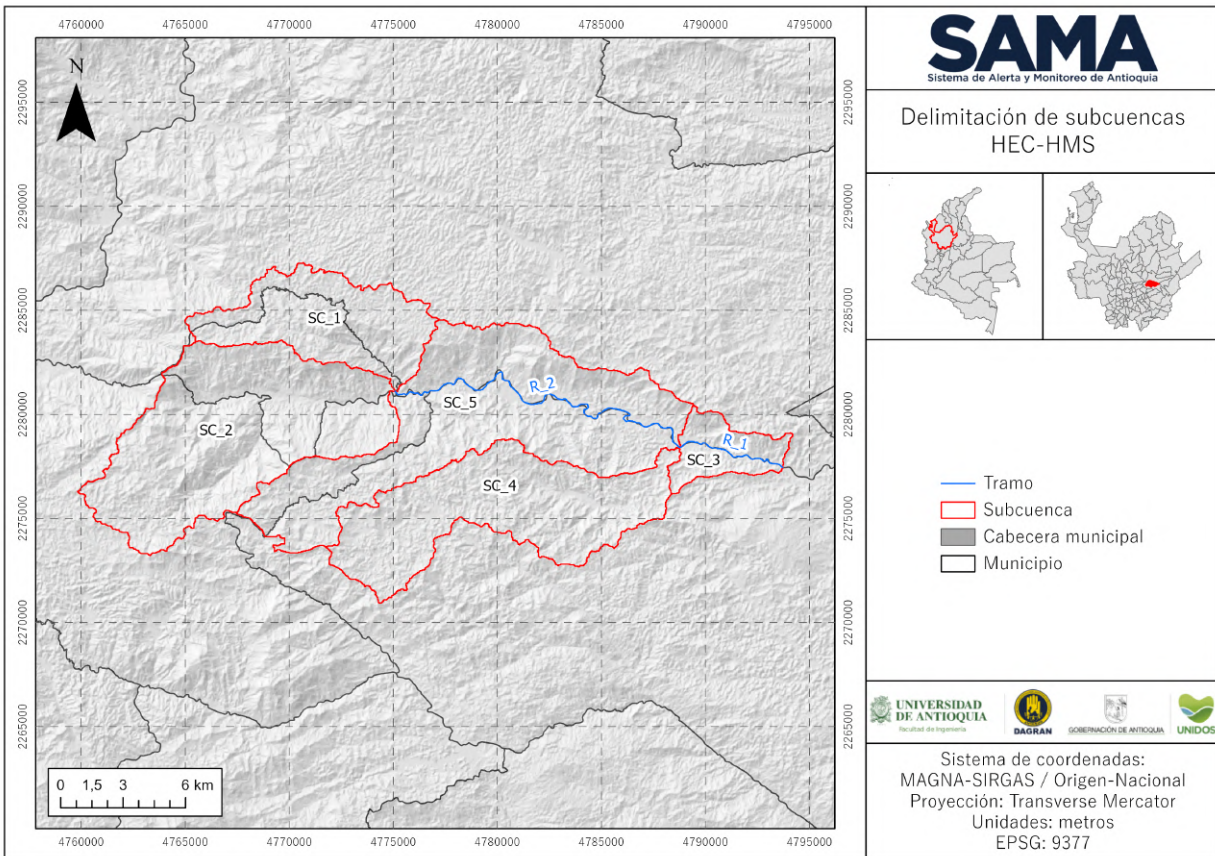
4.1.3 Modelos de Elevación Digital – DEM

Los DEM son representaciones simplificadas del terreno teniendo como variable la altura respecto al nivel del mar en cada una de sus celdas, de esta manera permite realizar análisis de relieve que se deriven a partir de los cambios espaciales en la variable. Existen múltiples productos de libre acceso que son desarrollados bajo diferentes metodologías con diferencias en la exactitud y resolución horizontal de estos. En este estudio se utilizaron los DEM disponibles en el portal web del proyecto ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12,5 x 12,5 metros (ASF DAAC, 2015). Los datos se pueden descargar en <https://search.asf.alaska.edu/#/>. A partir del ráster de alturas se obtuvieron la dirección de flujo y ráster de flujo acumulado como insumo para la delimitación de la cuenca y cálculo de los parámetros morfométricos; en especial se destaca el área de la cuenca que es uno

de los parámetros de entrada del modelo GR4J, además, estos modelos se ingresaron al modelo HEC-HMS para delimitar la cuenca con sus respectivas microcuencas y tramos (reach) (Figura 12).

Figura 12

Delimitación de cuenca y subcuencas junto con los tramos (reach) generados por HEC-HMS



4.2 Implementación del modelo GR4J

El modelo de lluvia-escorrentía GR4J se basa en dos tanques de almacenamiento, también llamados reservorios o embalses, secuenciales que imitan los procesos de generación de escorrentía a escala de cuenca. El primer tanque simula el balance de la humedad del suelo a partir de la evaporación y la precipitación de la serie temporal de entrada. La cantidad de humedad retenida por el suelo está controlada por un parámetro que es un umbral que representa la capacidad máxima de almacenamiento de este. El agua que sale del embalse se

divide en dos flujos: a) un flujo rápido que representa la respuesta a corto plazo y b) un flujo lento que representa la respuesta lenta del sistema, para continuar al segundo reservorio. El flujo que va al segundo tanque está determinado por el coeficiente de intercambio de aguas subterráneas. Al igual que el primero, el segundo tanque de almacenamiento tiene un umbral que representa la máxima cantidad de agua que puede retener. Finalmente, el recorrido de ambos flujos (rápido y lento) se establece mediante un hidrograma unitario (Tabla 8). El modelo está disponible mediante macros en una hoja de cálculo de Excel. El proceso de calibración se realizó empleando la herramienta solver disponible en este mismo software (Cantoni et al., 2022; Carvajal y Roldán, 2007).

Tabla 8

Parámetros de calibración del modelo GR4J

Parámetro	Descripción
X1 (mm)	Capacidad máxima del tanque de producción
X2 (mm)	Coefficiente de intercambio de aguas subterráneas
X3 (mm)	Capacidad máxima para el tránsito en canales
X4 (día)	Tiempo base del hidrograma unitario UH1

La información de entrada (inputs) que requiere el modelo es: la serie de precipitación representativa de la cuenca (la cual se calcula a partir de los polígonos de Thiessen) a escala diaria, el área de la cuenca, la cual se calcula con la ayuda de SIG y la de evapotranspiración potencial (ETP) que se asumió un valor constante para cada día. El valor estimado a partir de la Ecuación 3 para la cuenca del río Nús fue de 3,34 mm/día y para la cuenca del río Penderisco fue de 2,94 mm/día.

El primer paso fue calcular la precipitación neta (P_n) o la capacidad de evapotranspiración (E_n) suponiendo que la capacidad de interceptación es cero, lo anterior se hace restando la evapotranspiración potencial a la precipitación (Carvajal y Roldán, 2007; Perrin et al., 2003):

$$\text{Si } P \geq E, \text{ entonces } P_n = P - E \text{ y } E_n = 0 \quad (4)$$

$$\text{Si } P \leq E, \text{ entonces } P_n = 0 \text{ y } E_n = E - P \quad (5)$$

En el caso de que P_n no sea igual a cero, una parte de P_n entra al tanque de producción (P_s):

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1}\right)^1\right) \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)} \quad (6)$$

P_s es determinada como una función del nivel S (almacenamiento) (Figura 13) en el tanque, donde X_1 (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción. Cuando E_n no es cero, una tasa real de evaporación es determinada como una función del nivel de almacenamiento de producción para calcular la cantidad de agua que se evapora del tanque (E_s):

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)} \quad (7)$$

Y el contenido de agua en el tanque se actualiza como:

$$S = S - E_s + P_s \quad (8)$$

Es necesario especificar que S en ningún momento puede ser mayor a X_1 . Además, una cantidad de agua se escapa del tanque debido a procesos de percolación ($Perc$):

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1} \right) \right]^4 \right\}^{-\frac{1}{4}} \quad (9)$$

Es importante aclarar que el valor $Perc$ es menor que S en todo momento y de la expresión anterior se puede observar que la percolación no contribuye significativamente al caudal. El nivel en el tanque es nuevamente actualizado como:

$$S = S - Perc \quad (10)$$

La cantidad total de agua (P_r) se divide en dos componentes de flujo, el 90 % de P_r se distribuye a través de un hidrograma unitario UH1 y luego por un tanque de distribución no lineal. El 10 % de restante de P_r es distribuido por medio de una hidrógrafa unitaria UH2.

Con UH1 y UH2, se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. UH1 y UH2 dependen del parámetro X4, pero UH1 tiene un tiempo base igual a X4 días, mientras que UH2 2·X4 días.

También es necesario calcular el intercambio de aguas subterráneas (F) la cual actúa en ambas componentes de flujo:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (11)$$

Donde R es el nivel en el tanque de distribución, X3 es la capacidad de referencia y X2 es el coeficiente de intercambio, este factor puede ser positivo (se importa aguas), negativo (hay perdida) o cero (no hay intercambio de agua). F no puede ser mayor que X2. El valor R se actualiza adicionando el valor de F y la salida de Q9 proveniente de UH1:

$$R = \max(0; R + Q9 + F) \quad (12)$$

El caudal de salida (Q_r) se calcula como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_2} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (13)$$

Q_r siempre es menor que R que se actualiza de la siguiente forma:

$$R = R - Q_r \quad (14)$$

La salida Q_1 proviene de UH2, la cual también es sujeta al intercambio de agua Fm de esta forma el componente Q_d queda definido como:

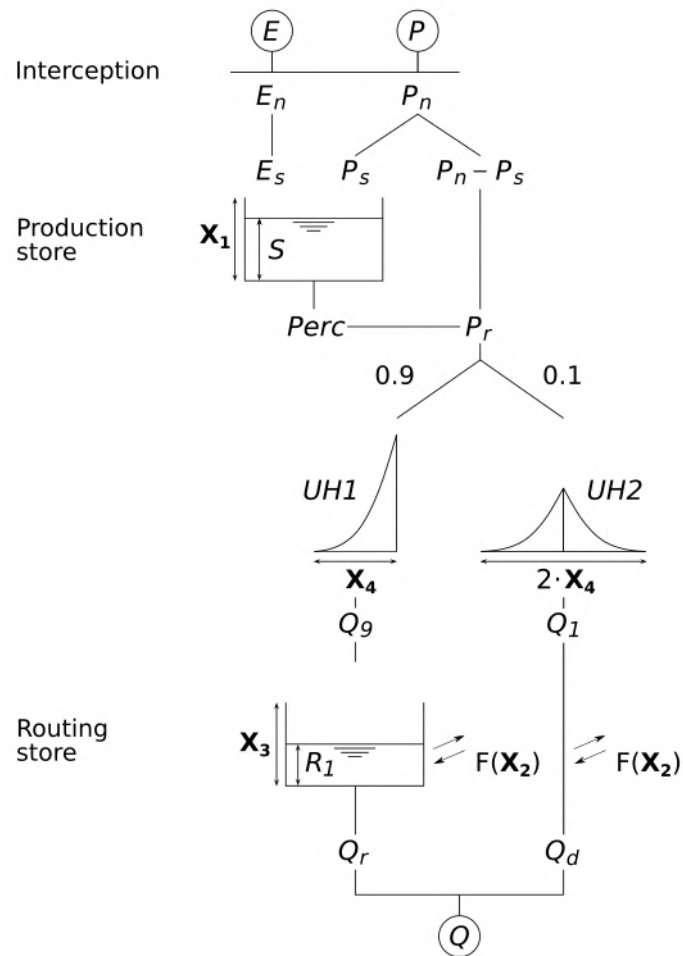
$$Q_d = \max(0; Q1 + F) \quad (15)$$

Finalmente, el caudal total se calcula como:

$$Q = Q_r + Q_d \quad (16)$$

Figura 13

Diagrama conceptual del funcionamiento del modelo GR4J



Nota. Fuente (Perrin et al., 2003).

4.3 Implementación del modelo HEC-HMS

El modelo HEC-HMS fue diseñado para simular procesos hidrológicos en sistemas de cuencas dendríticas, simulando la relación lluvia-escorrentía y procesos de enrutamiento en cuencas naturales o controladas, es decir, los cambios en la forma del hidrograma. El modelo ha sido usado con diferentes objetivos de estudio, destacando en la predicción de eventos de inundación en grandes cuencas y crecientes a diferentes escalas espaciales logrando predecir caudales máximos con precisión (Oleyiblo y Li, 2010; Ramly y Tahir, 2016).

El funcionamiento del modelo se puede dividir en cuatro fases las cuales se pueden representar de la siguiente forma:

- En una primera instancia se calcula la lluvia neta, la cual se puede entender como la precipitación que se convierte en escorrentía directa luego de procesos de infiltración o que sufren procesos de retención. En el modelo se representa en las variables canopy, surface y loss. Canopy representa la precipitación que queda retenida por las hojas de los árboles para después evaporarse, surface es aquella precipitación que puede quedar retenida en pequeñas cantidades superficiales para evaporarse o infiltrarse y loss representa aquella precipitación que es infiltrada.
- En la segunda fase se calcula la escorrentía directa que es generada por la precipitación neta la cual se representa en el proceso transform.
- El tercer paso es calcular la evolución de la escorrentía base a lo largo del tiempo sumando la escorrentía directa, lo anterior se conoce como flujo base (baseflow) al interior del software.
- Por último, en la cuarta fase se calcula cómo evoluciona el hidrograma a medida que recorre a lo largo de un cauce o a través de un depósito o embalse, lo cual se denomina tránsito del hidrograma y está representado por el proceso routing al interior del modelo (Sánchez San Roman, 2015).

Todos elementos mencionados anteriormente (canopy, surface, loss, transform, baseflow y routing) poseen diversos métodos de estimación o cálculo, se resalta la importancia de realizar una selección adecuada de estos según el objetivo del ejercicio de modelación debido a que HEC-HMS posee la cualidad de que puede modelar eventos de horas a días o eventos de meses y años según se elijan los métodos de cálculo adecuados. Para el ejercicio de modelación del presente trabajo se elaboró un modelo de eventos debido que el objetivo

es la simulación de crecientes que ocurren a una escala de horas. En este caso específico, no fue necesario tener en cuenta métodos para simular los elementos surface y canopy debido a que estos están destinados a modelos continuos. Los métodos seleccionados para el presente trabajo fueron los siguientes:

4.3.1 *Loss*

La selección del método loss es de suma importancia debido a que este es el que permite que HEC- HMS se pueda usar como modelo continuo o para eventos. El método que se implementó en este proceso es número de curva SCS que considera el exceso de precipitación en función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo, el uso de la tierra y la humedad antecedente, utilizando la siguiente ecuación (Sánchez San Roman, 2015; US Army Corps Of Engineers, 2021):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (17)$$

Donde P_e representa el exceso de precipitación acumulada, P la precipitación acumulada, I_a la abstracción inicial y S la retención máxima potencial.

4.3.2 *Transform*

El método seleccionado fue el Hidrógrafa Unitaria SCS que requiere como parámetros de entrada el tiempo de retraso el cual se estima de la siguiente forma:

$$t_{lag} = 0,6 * t_c \quad (18)$$

Donde t_c corresponde al tiempo de concentración y t_{lag} al tiempo de retraso. Esta relación estima los excesos de precipitación que se transforman en escorrentía.

4.3.3 Routing

El método elegido para el enrutamiento de canales es Lag, es el más simple de todos los métodos de enrutamiento simulando la duración del flujo de agua a través de los reach (US Army Corps Of Engineers, 2021).

4.3.4 Baseflow

En este proceso se selecciona el método Constant Monthly Baseflow, el cual permite especificar el caudal base constante para cada mes del año. Lo anterior se realizará a partir del promedio mensual multianual del mes de enero.

4.3.5 Análisis de sensibilidad

La abstracción inicial, el número de curva, tiempo de retraso y tiempo de recorrido a través de los tramos (lag) fueron sometidos a análisis de sensibilidad para reducir el tiempo de calibración e identificar aquellos a los que la cuenca es más sensible. Estos parámetros serán optimizados mediante procesos de calibración automática dentro del software en el cual se evalúa el rendimiento del modelo para simular la creciente observada.

Es importante aclarar que este ejercicio sólo se realizó sobre la cuenca del río Nús debido a que se requieren datos sub diarios, respondiendo a la dinámica de las crecientes que ocurren en intervalos de tiempo de horas. La ausencia de datos horarios es recurrente en la base de datos del IDEAM; particularmente para la cuenca del río Penderisco no existen datos de caudal con la resolución requerida.

Se obtuvo una serie de caudales con resolución temporal horaria de la estación CARA-MANTA [23087160] en el periodo disponible de descarga hasta el 03 de enero de 2023. Los datos de pluviómetro perteneciente a la red del SAMA identificado con código sp_140 que monitorea la precipitación a una resolución temporal de 5 minutos y se encuentra al interior de la cuenca del río Nús.

Por último, debido a la corta duración del hidrograma obtenido para la cuenca del río Nús, sólo se pudo realizar calibración del modelo. La ausencia de datos es un problema común en estudios hidrológicos e hidráulicos y en la literatura existen estudios que han enfrentado el

mismo problema, encontrando evidencia de modelos de creciente realizados en HEC-HMS que solo realizan procesos de calibración mas no validación (de la Ossa Doria y González Campo, 2011; Marín Muñoz, 2013; Marín Muñoz y Barros Martínez, 2016).

4.3.6 Generación de crecientes para tormentas de diseño

Una vez el modelo HEC-HMS fue calibrado se generaron las tormentas de diseño a partir de la curva IDF correspondiente a la estación GUAYABITO [27015190] del IDEAM por medio del método de bloques alternos (Te Chow et al., 1993). Se generan tormentas de diseño para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años con una duración de 5 horas y una frecuencia de 15 minutos. La elección de la duración de la tormenta se realiza respecto al tiempo de concentración de la cuenca (4.7 horas). Estos hietogramas fueron ingresados al modelo calibrado para obtener la creciente para cada tormenta según su periodo de retorno.

4.4 Evaluación del rendimiento de los modelos

Para realizar el proceso de calibración y validación de los modelos fue necesario realizar una evaluación del rendimiento de estos para representar el caudal observado. La cuenca del río Nús (río Penderisco), usando el modelo GR4J, para caudales máximos, se calibró en el periodo comprendido entre el 23 de febrero de 2018 (2 de enero de 2016) hasta 2 de abril de 2021 (28 de agosto de 2020), y se validó desde 30 de abril de 2021 (29 de agosto de 2020) hasta 30 de noviembre de 2022 (25 de diciembre de 2022). Para caudales medios, se calibró desde 24 de marzo de 2006 (1 de abril de 1990) hasta 18 de noviembre de 2012 (30 de abril de 2005) y se validó desde 26 de febrero de 2018 (1 de mayo de 2005) hasta el 30 de noviembre de 2022 (14 de noviembre de 2012). Durante el proceso de calibración el primer año de simulación es tomado como año de calentamiento. El corto periodo de registro de caudal máximo, fuerza que los periodos de tiempo de la calibración y validación fueran más cortos de lo deseado. Para el modelo HEC-HMS se calibró desde 6 de enero de 2023 12:00 hasta 7 de enero de 2023 19:00, únicamente para la cuenca del río Nús.

El método para evaluar el rendimiento de los modelos es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, ver ecuación 18), el cual evalúa el comportamiento real y el modelado. Varía entre ∞ a 1 donde a partir de valores superiores a 0.36 se puede considerar que el rendimiento del modelo es aceptable (Durães et al., 2011).

$$NSE = \frac{1 - \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (19)$$

Donde Q_{obs} (Q_{sim}) corresponde al valor observado (simulado) y \bar{Q}_{obs} (\bar{Q}_{sim}) es el promedio de los valores observado (simulado) (Naqash et al., 2023).

Una vez que los modelos fueron calibrados y validados se generó el escenario de control el cual comprendió el periodo desde el 1 enero de 2000 hasta el 31 de diciembre de 2020.

4.5 Evaluación de escenarios de CC

Una vez realizada la validación y calibración de los modelos hidrológicos con las observaciones, se procedió a analizar las proyecciones de cambio climático para las variables precipitación y temperatura durante tres periodos, corto (2022-2040), mediano (2040-2060) y largo plazo (2060-2100). El objetivo es cuantificar las tendencias de cambio en la precipitación que proyectan los Modelos de Circulación Atmosférica Global (CMIP) y los Modelos Regionales de Circulación (CORDEX) en los periodos futuros (proyectados) bajo escenarios de cambio climático, posteriormente, se busca cuantificar cómo dichas tendencias influyen sobre el régimen de caudal y precipitación en las cuencas de estudio.

Los datos usados fueron: las salidas de los modelos globales CMIP5 y las salidas regionales de CORDEX que integran un proceso de downscaling dinámico de las simulaciones CMIP5. Las proyecciones para ambos grupos están definidas en el periodo 2005-2100 bajo diferentes experimentos que representan los escenarios de cambio climático. Además, se usaron los datos de CMIP6 cuyas proyecciones abarcan el periodo 2015-2100. Los datos fueron obtenidos desde los portales <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/> (CMIP5), <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> (CMIP6) y <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/> (CORDEX).

Los escenarios de cambio climático seleccionados fueron RCP8.5 (Riahi et al., 2011) para CORDEX y CMIP5, y SSP5-8.5 para CMIP6 (O'Neill et al., 2016) que representan la perspectiva más pesimista respecto a las políticas y cambios en el panorama de emisiones respecto al presente. Los productos de CMIP5 cuentan con un total de 49 modelos, CMIP6 con 33 y CORDEX con 9 para la región de Centro América (CAM, por sus siglas en ingles), en la cual se encuentra Colombia. Para el análisis de proyecciones se realizó una selección de modelos basada en literatura, se destaca notoriamente el trabajo de Arias et al. (2021)

en el cual se evaluó el rendimiento de los modelos a la hora de representar los valores de precipitación y temperatura sobre Colombia, comparándolos con observaciones satelitales, reanálisis y datos medidos in-situ (Tabla 9). De acuerdo con los resultados de Arias et al. (2021) se seleccionó el mejor modelo de precipitación y temperatura de cada experimento.

Tabla 9

Modelos seleccionados para la simulación del escenario de CC de acuerdo con las variables a evaluar

	Temperatura	Precipitación	Resolución espacial
CMIP6	GFDL-CM4	GFDL-CM4	100 km
CMIP5	MPI-ESM-LR	CNRM-CM5	100 km
CORDEX	MPI-M-MPI-ESM-LR	CERFACS-CNRM-CM5	44 km

Para aplicar los cambios proyectados por cada una de las simulaciones descargadas, se calcularon las tendencias anuales de precipitación para los periodos 2040-2060, 2060-2080 y 2080-2100. Las tendencias, indican a que tasa se evidencia un decrecimiento, crecimiento o nulo cambio de las series de precipitación. De esta manera se se aplica la tasa a la serie de la variable climática (precipitación) original en cantidades fijas. Para este estudio la variable arbitraria corresponderá a la tendencia anual de precipitación para cada periodo de tiempo (2040-2060, 2060-2080 y 2080-2100). La desventaja de este método es que los escenarios pueden representar cambios que no sean físicamente plausibles (Ecuación 20) (Githui et al., 2009).

$$P_{cc} = P_r + P_r * P_{cc} \quad (20)$$

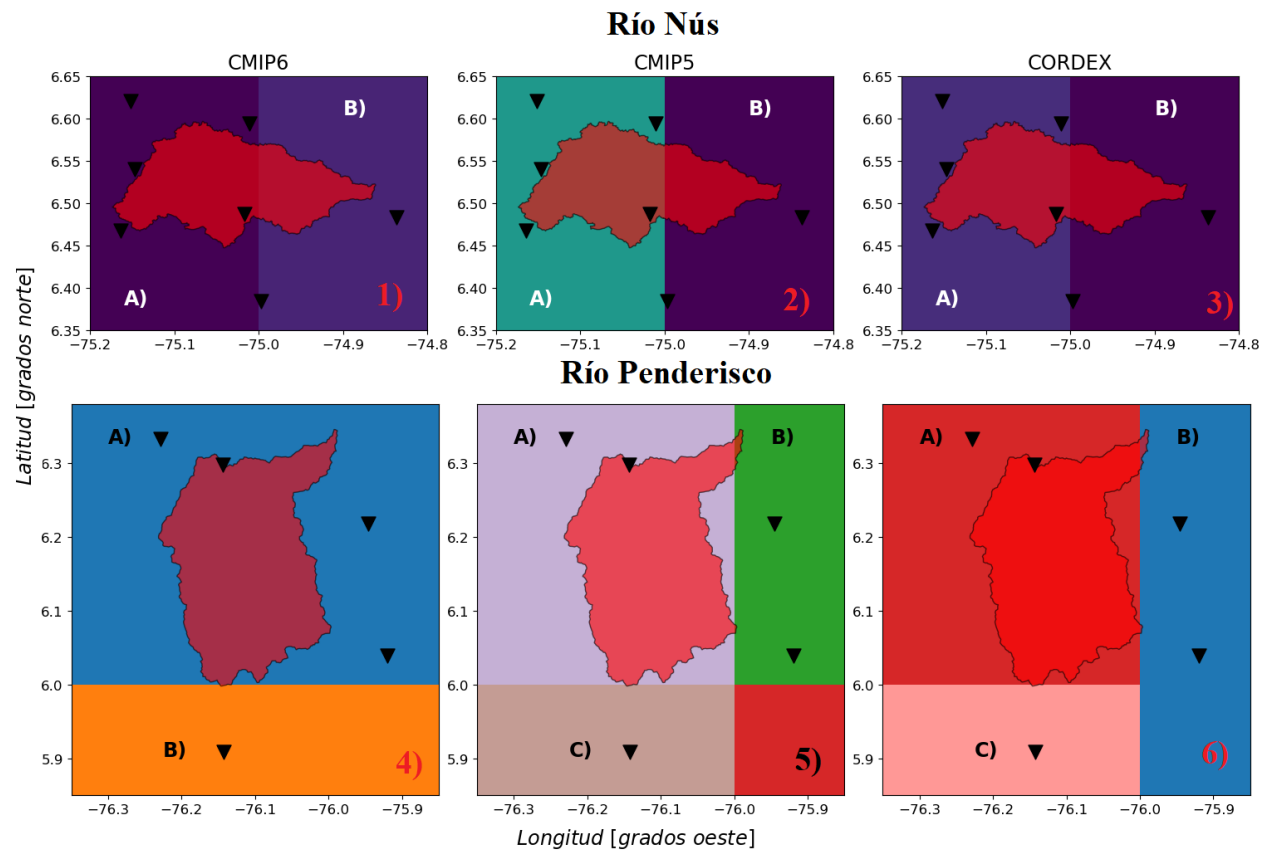
Donde P_r corresponde a la serie de precipitación de referencia, ΔP_{cc} corresponde a la tendencia calculada en el escenario de CC y P_{cc} es la serie de precipitación bajo el escenario de CC elegido.

También se tuvo en cuenta la forma en la que están contenidas las cuencas en los resultados de las proyecciones de los modelos a la hora de obtener las tendencias. En la Figura 14 se puede observar que la cuenca del río Nús se encuentra contenida entre 2 pixeles en partes casi iguales, por lo cual es necesario realizar un promedio espacial entre estos para obtener la tendencia representativa de la cuenca. Por el contrario, la mayor parte de la cuenca del río Penderisco está contenida por un solo pixel (Figura 14.4), solo en CMIP5 (Figura 14.5)

y CORDEX (Figura 14.6) una reducida fracción de la cuenca es capturada por otro píxel (B) pero esta se considera despreciable.

Figura 14

Distribución espacial de las cuencas de los ríos Nús y Penderisco sobre los píxeles de las bases de datos CMIP5, CMIP6 y CORDEX



Nota. Los triángulos negros representan las estaciones IDEAM utilizadas en este estudio.

Es importante destacar que en este estudio no se tendrán en cuenta otros factores asociados al CC como lo pueden ser cambios de uso y cobertura del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) o cambios en la temperatura entre muchos otros factores.

4.6 Análisis de frecuencia

Los datos de caudal máximo diario y caudal medio diario para las cuencas de los ríos Nús y Penderisco fueron descargados del Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME) del IDEAM, específicamente para las estaciones

CARAMANTA - AUT [23087160] y LA MAGDALENA - AUT [11077020] cuya ubicación constituye el punto de aforo de las cuencas respectivamente.

Inicialmente, a partir de las series de caudales máximos diarios y caudales medios diarios se construyeron series anuales de valores máximos teniendo en cuenta la disponibilidad de datos. Se realizó una caracterización usando estadística descriptiva a estas series para obtener parámetros estadísticos necesarios para el análisis como medidas de dispersión y de tendencia central, de igual forma, se agruparon los datos en intervalos para la realización del análisis de frecuencias obteniéndose el número de datos en cada intervalo, calculándose la frecuencia relativa y frecuencia acumulada de los mismos. Los procedimientos anteriores constituyen la base para el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad (FDP).

Posteriormente se realizó el ajuste de los datos de caudal por el método de los momentos, a tres funciones de distribución de probabilidad - FDP comúnmente usadas para variables hidrológicas: Normal, Lognormal y de Valor extremo tipo I o Gumbel (Te Chow et al., 1993) cuyas funciones de densidad de probabilidad se presentan en las Ecuaciones 21, 22 y 24 respectivamente.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (22)$$

$$y = \log x \quad (23)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right] \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}s_x}{\pi} \quad (25)$$

$$u = \bar{x} - 0,5772\alpha \quad (26)$$

Donde \bar{x} es la media de la muestra y s_x la desviación estándar.

Para determinar la bondad del ajuste de las FDP empleadas se compararon los valores teóricos y de la muestra de las funciones de frecuencia relativa y de frecuencia acumulada.

En el caso de la función de frecuencia relativa se utilizó la prueba χ^2 la cual está dada por la Ecuación 27.

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^m \frac{n [f_s(x_i) - p(x_i)]^2}{p(x_i)} \quad (27)$$

Donde m es el número de intervalos en los que se dividió la muestra, n es el número de datos de la muestra, $n f_s(x_i)$ es el número de ocurrencias observadas en el intervalo i y $n p(x_i)$ es el correspondiente número esperado de ocurrencias en el intervalo i .

La hipótesis nula para la prueba χ^2 , es decir, que los datos sí se ajustan adecuadamente a la FDP, se rechaza (es decir, el ajuste se considera inadecuado) si el valor de χ_c^2 es mayor que un valor límite $\chi_{\nu, 1-\alpha}^2$ con ν grados de libertad calculados como $\nu = m - p - 1$ con m el número de intervalos en los que se dividió la muestra, p el número de parámetros utilizado en el ajuste de la FDP propuesta y el nivel de confianza $(1 - \alpha)$ escogido para la prueba, donde α se conoce como el nivel de significancia.

Para la función de frecuencia acumulada se empleó la prueba Kolmogórov-Smirnov (28) que consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia entre la FDP observada $F_0(x)$ y la FDP teórica $F(x)$.

$$D = \text{Máx} | F_{0x} - F_{(x)} | \quad (28)$$

La bondad de ajuste de esta prueba se evaluó comparando D con $D_{n, \alpha}$ donde n corresponde al número de datos de la muestra y α al nivel de significancia elegido para la prueba. La FDP propuesta se ajusta adecuadamente a los datos observados si $D \leq D_{n, \alpha}$.

Una vez seleccionada la FDP con mejor bondad de ajuste se procedió a calcular los factores de frecuencia (K_T) para los diferentes periodos de retorno (T) y los parámetros de la FDP con mejor ajuste. A continuación, se presenta la formulación para el cálculo de los factores de frecuencia según la FDP.

- FDP Normal

$$K_T = F^{-1} \left(1 - \frac{1}{T} \right) \quad (29)$$

- FDP Lognormal

$$K_T = \frac{\exp \left[K_T (\ln(1 + Cv^2))^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{\ln(1 + Cv^2)}{2} \right] \right] - 1}{Cv} \quad (30)$$

- FDP de Valor extremo tipo I o Gumbel

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (31)$$

Finalmente, se estimó la magnitud de los caudales máximos (X_T) asociados a los periodos de retorno (T) aplicando la Ecuación 32.

$$X_T = \bar{X} + K_T S \quad (32)$$

Donde \bar{X} es la media y S es la desviación estándar de la población los cuales corresponden a la media \bar{x} y la desviación estándar s_x de la muestra.

Teniendo en cuenta que las estimaciones estadísticas presentan un grado de incertidumbre se estableció un rango o intervalo de confianza donde es posible que se encuentre la estimación correcta para la magnitud de la variable analizada. El tamaño del intervalo de confianza depende del nivel de confianza que se relaciona con el nivel de significancia α .

Los límites superior e inferior del intervalo de confianza se calcularon dependiendo de la FDP como sigue:

- FDP Normal

$$Limite = X_T \pm z_{1-\alpha} S_T \quad (33)$$

$$S_T = S_x \frac{\sqrt{1 + \frac{z_T^2}{2}}}{n} \quad (34)$$

- FDP Lognormal

$$Limite = X_T \pm z_{1-\frac{\alpha}{2}} S_T \quad (35)$$

$$S_T = \sigma \left(\frac{1 + (C_v^3 + 3C_v) K_T + \frac{1}{4} (C_v^8 + 6C_v^6 + 15C_v^4 + 16C_v^2 + 2) K_T^2}{n} \right)^{1/2} \quad (36)$$

- FDP de Valor extremo tipo I o Gumbel

$$Limite = X_T \pm z_{1-\alpha} S_T \quad (37)$$

$$S_T = S_x \left[\frac{(1 + 1,1396K_T + 1,1K_T^2)}{n} \right]^{1/2} \quad (38)$$

Con S_T el error estándar y $Z_{1-\alpha}$ la variable normal estandarizada asociada a una probabilidad acumulada de $1 - \alpha$.

5 Resultados

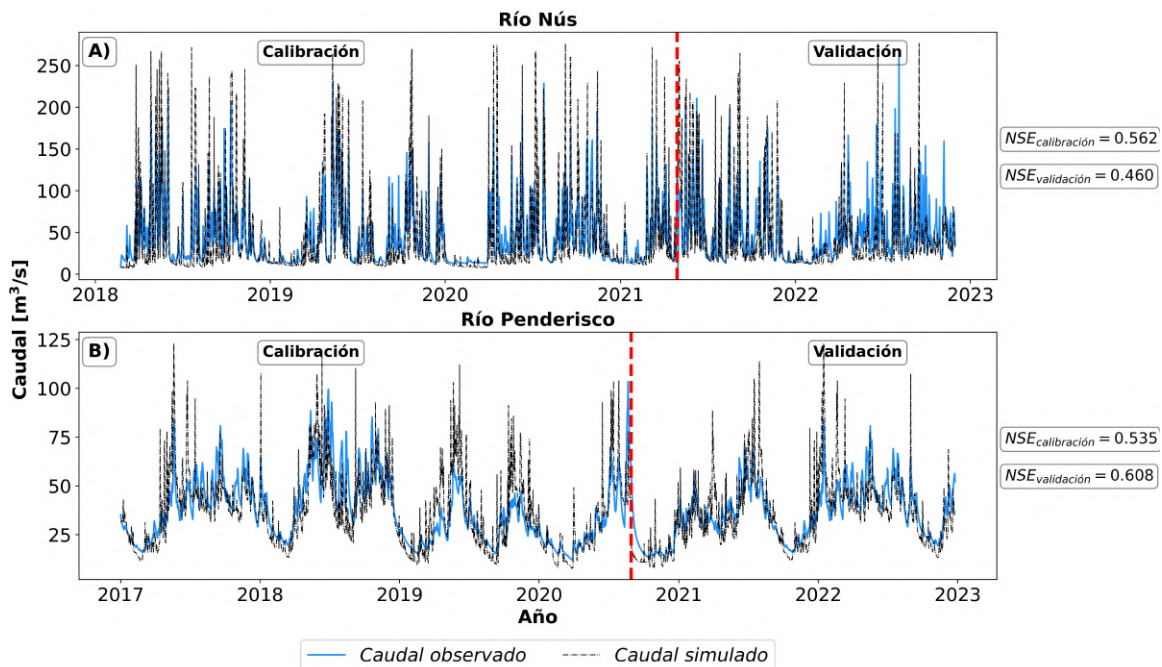
5.1 Calibración, validación y periodo de control del modelo GR4J

Una vez ingresados los datos que requiere el modelo GR4J para su funcionamiento, detalladamente descritos en la sección 4.2, se procedió a realizar el proceso de calibración. Para los caudales máximos se realizó el proceso de calibración que arrojó un valor de Nash de 0,622 y posteriormente en la validación se obtuvo un NSE igual a 0,405 para la cuenca del río Nús (Figura 15A). De manera homologa, para la cuenca del río Penderisco durante el proceso de calibración se obtuvo un NSE de 0.567 y para el proceso de validación 0,579 (15B)

Para los caudales medios, se realizó el mismo procedimiento y se obtuvo un NSE en la calibración y validación de 0.562 y 0.460 respectivamente para la cuenca del río Nús (Figura

Figura 15

Calibración y validación de caudales máximos en el modelo GR4J

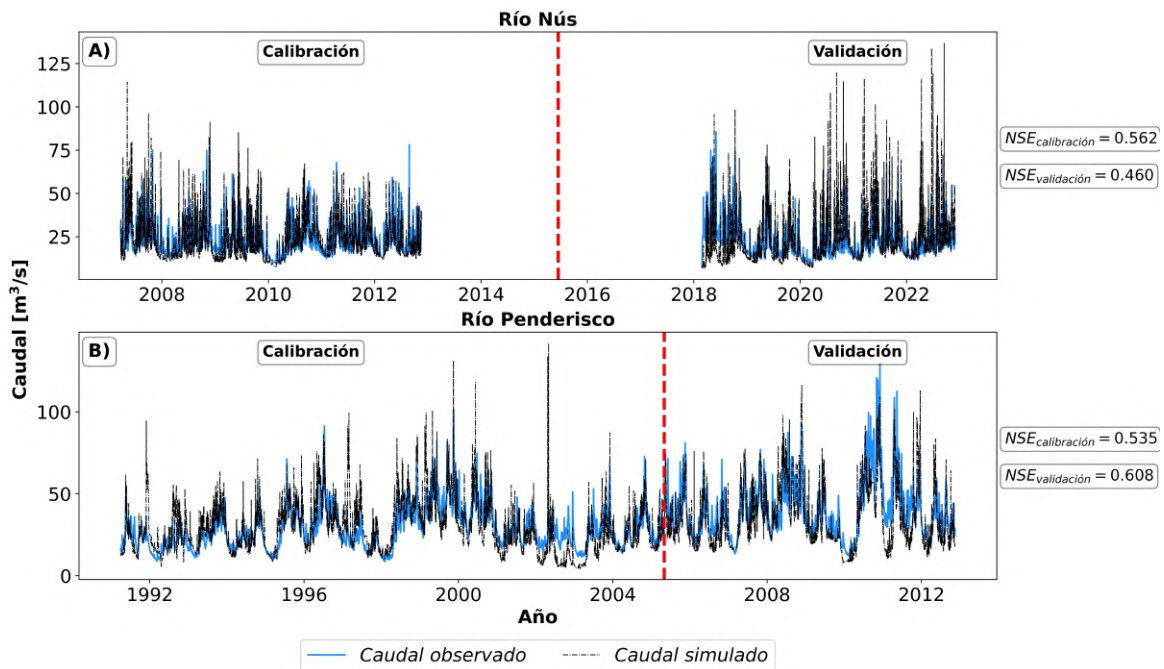


Nota. La línea roja indica la separación entre los periodos de tiempo empleados para las fases de calibración y validación.

16A). Por su parte en la cuenca del río Penderisco el NSE tuvo un valor de 0.535 para la calibración y 0.608 para la validación (Figura 16B). Debido a que durante el proceso de calibración – validación el valor NSE fue mayor a 0.36 pero menor a 0.70 el modelo GR4J obtuvo un rendimiento aceptable sobre ambas cuencas hidrográficas. Los parámetros óptimos del modelo que fueron calibrados y validados se pueden ver en la Tabla 10.

Figura 16

Calibración y validación de caudales medios en el modelo GR4J



Nota. La línea roja indica la separación entre los periodos de tiempo empleados para las fases de calibración y validación.

Tabla 10

Parámetros calibrados para las simulaciones de caudal máximo y medio con el modelo GR4J para las cuencas de los ríos Nús y Penderisco

	Río Nus		Río Penderisco	
	Caudal máximo	Caudal medio	Caudal máximo	Caudal medio
X1 (mm)	50,773	11442,28	1176,870	2029,589
X2 (mm)	3,943	-1,196	7,223	4,708
X3 (mm)	15,425	47,333	151,158	167,227
X4 (día)	1,684	1,926	1,109	1,463

Una vez realizado el proceso de calibración y validación y determinar que el rendimiento es aceptable se procede a recrear el escenario de control para los caudales máximos y medios de ambas cuencas hidrográficas (Figura 17).

5.2 Calibración del modelo HEC-HMS

El resultado de calibración del modelo HEC-HMS para simular la creciente ocurrida entre las 04:00 y las 18:00 del del 7 de enero del 2023 fue un NSE igual a 0.802 (Figura 18). La calibración se realizó a partir de los resultados de la prueba de sensibilidad realizada, en el cual se determinaron que parámetros tiene mayor impacto sobre sobre la cuenca, y cuyos resultados se pueden ver en la Tabla 11.

Tabla 11

Valores iniciales y optimizados resultantes de la prueba de sensibilidad

Elemento	Parámetro	Valor inicial	Valor óptimo
SC_2	SCS número de curva	45,535	46,32
SC_1	SCS número de curva	39,631	42,272
SC_5	SCS número de curva	49,076	65,335
SC_4	SCS número de curva	48,511	42,358
SC_3	SCS número de curva	56,090	41,579
R_2	Lag	35	86,005
R_1	Lag	15	100,96

5.3 Simulación de tormentas a partir de tormentas de diseño con diferente periodo de retorno

Una vez realizado el proceso de calibración se procede a ingresar los hietogramas de diseño al modelo HEC-HMS (Figura 19) obteniéndose que el caudal pico se mantiene entre las 06:00 y las 08:00 horas en los diferentes periodos de retorno, no obstante, el tiempo de drenado de la cuenca aumenta a medida que el periodo de retorno crece. También se observa que el caudal pico más alto corresponde al periodo de retorno de 100 años con valor de 324 m³/s mientras que el pico más bajo corresponde al periodo de retorno de 2 años con un valor de 57.4 m³/s. Lo anterior indica que el caudal pico de los diferentes periodos de retorno evaluados es proporcional, es decir, al periodo de retorno más bajo se le asocia el pico de

Figura 17

Escenario de control de caudales máximos y medios para las cuencas de los ríos Nús y Penderisco

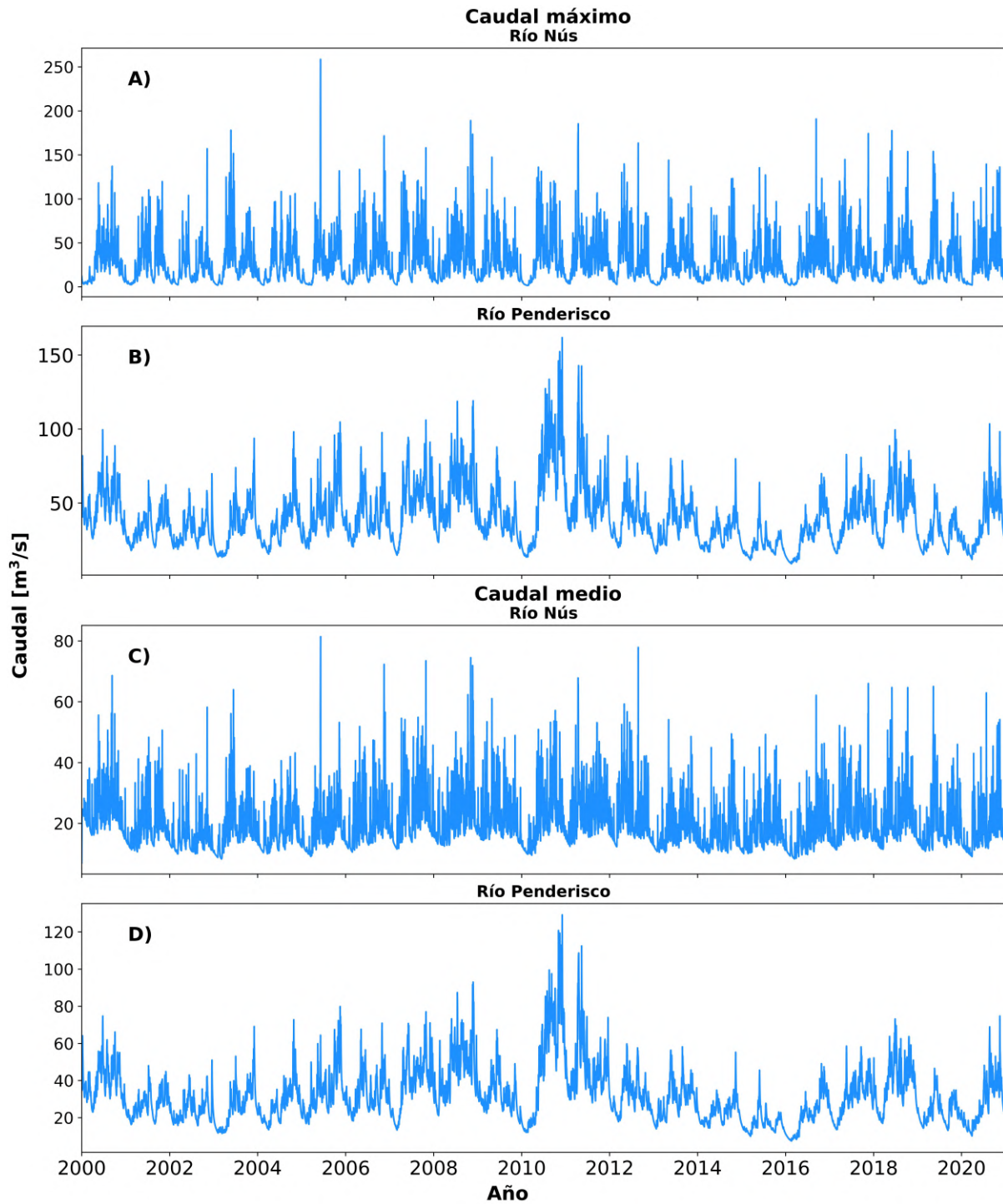
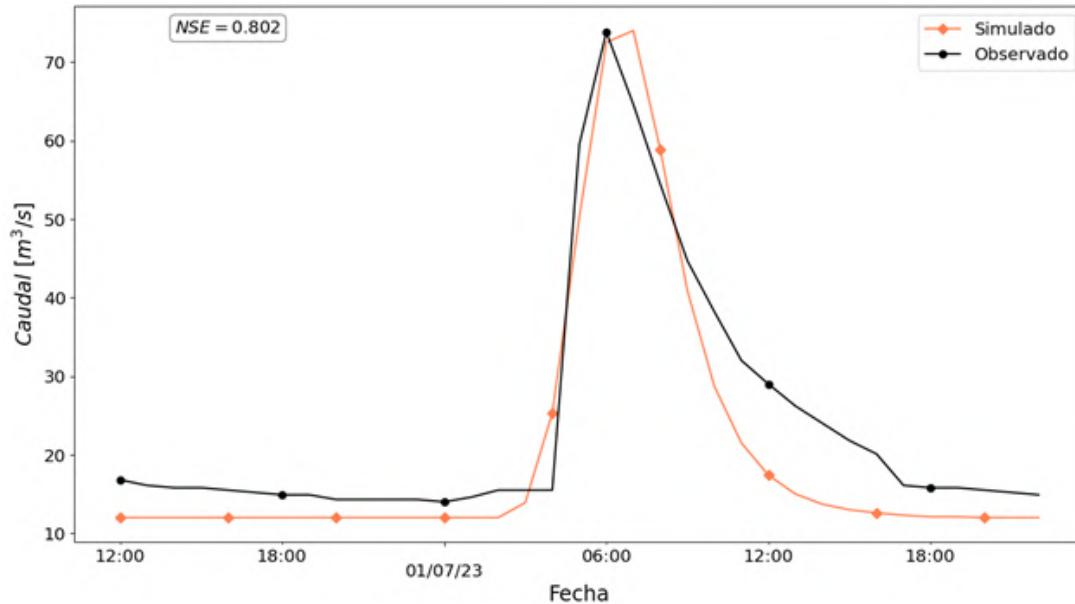


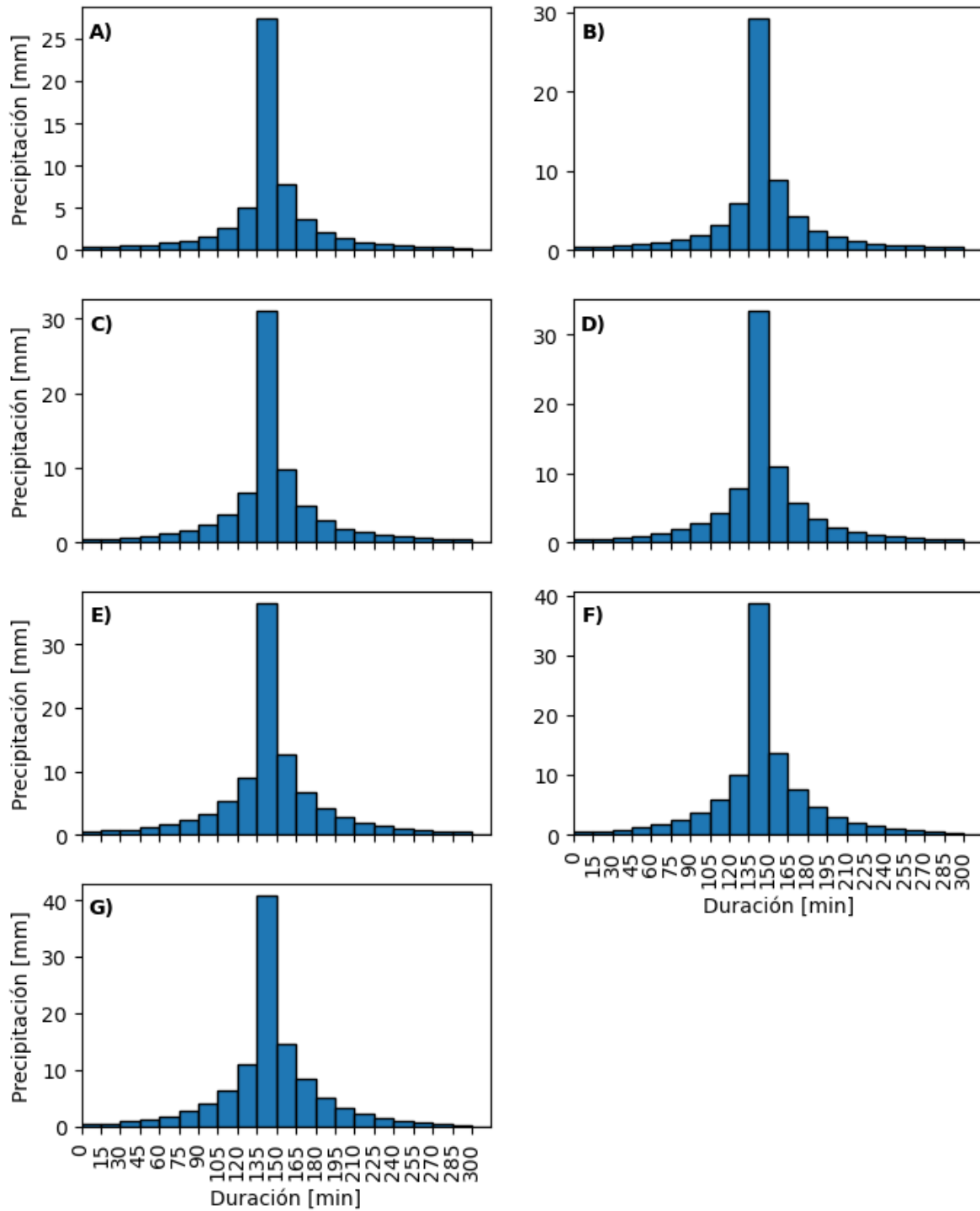
Figura 18

Calibración del modelo de crecientes para el evento del 7 de enero de 2023



menor caudal (Figura 20).

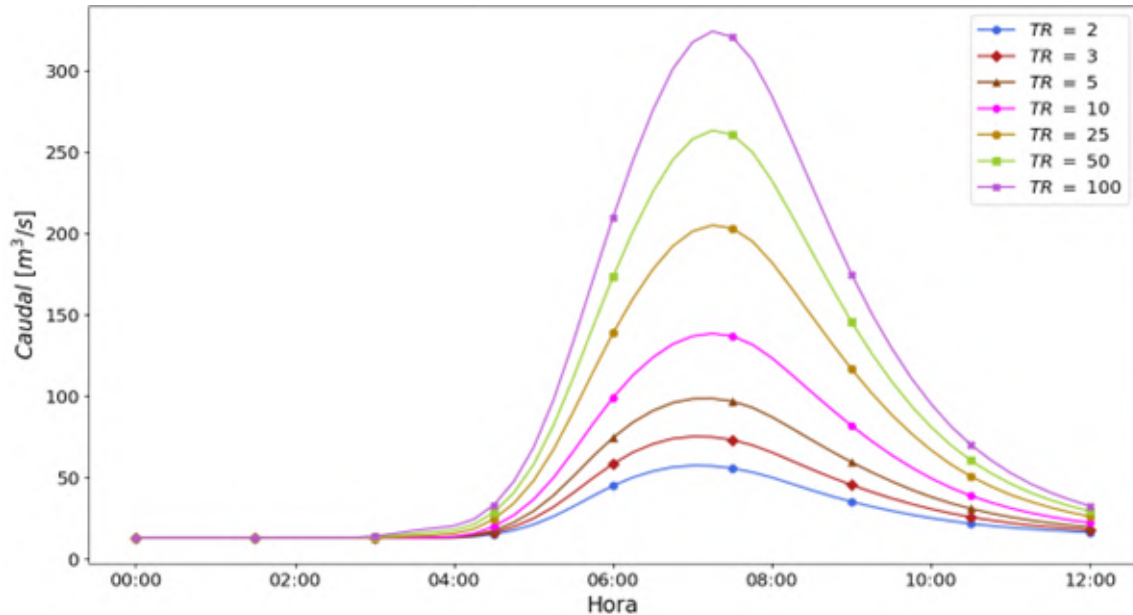
Analizando los caudales máximos registrados en la estación Caramanta desde el 01 enero de 2016 se evidencia un valor de $306 \text{ m}^3/\text{s}$ registrado el 11 de septiembre de 2016 por lo cual ya se cuenta en la base de datos un registro asociado a un caudal con un valor cercano a un periodo de retorno de 100 años, excediendo 15 veces el caudal medio de la cuenca. Este resultado, es consistente con los registros de la estación de monitoreo. En contraposición con los eventos que se han registrado en la cuenca del río Nús se evidencian eventos de inundación en los últimos 16 años con una frecuencia media de 0.5 por año con afectaciones que van desde destrucción de bienes materiales hasta la pérdida de vidas que se podrían estar desencadenado ante eventos de precipitación similares, la importancia del monitoreo en esta cuenca plantea que la posibilidad de tener nuevamente un evento extremo con periodo de retorno de 100 años o superior.

Figura 19*Hietogramas de diseño*

Nota. Periodos de retorno de A) 2 años, B) 3 años, C) 5 años, D) 10 años, E) 25 años, F) 50 años y G) 100 años.

Figura 20

Crecientes obtenidas a partir de las tormentas de diseño para diferentes periodos de retorno



5.4 Escenarios de CC

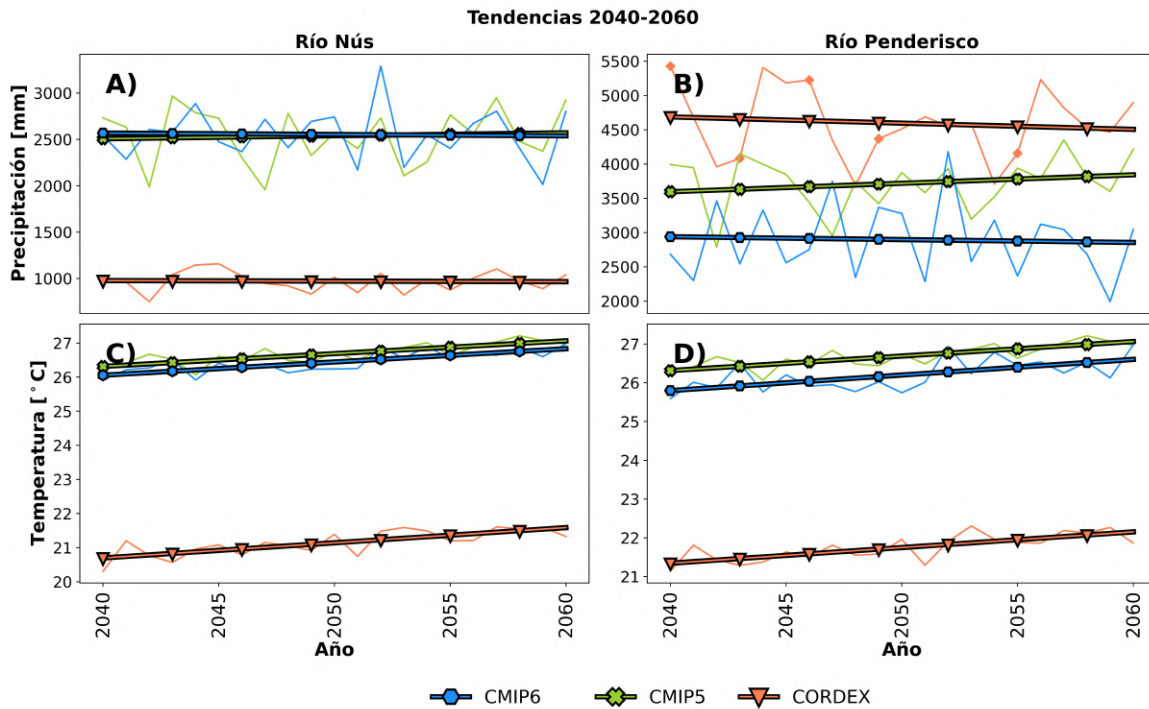
5.4.1 2040 - 2060

Analizando las tendencias de precipitación (Figura 21A y 21B) y temperatura (Figura 21C y 21D) proyectadas por los modelos se observa que para la cuenca del río Penderisco, CORDEX y CMIP6 denotan una reducción de -9,072 mm/año y -4,2336 mm/año respectivamente y CMIP5 se proyecta un aumento de la precipitación de 12,3552 mm/año durante este periodo de tiempo. Para la cuenca del río Nús, CMIP5 evidencia un aumento de 3,1536 mm/año de la precipitación, mientras que CMIP6 y CORDEX proyecta una disminución en la precipitación -1,12 mm/año y -0,06048 mm/año respectivamente. Es importante resaltar que en la cuenca del río Nús el acumulado anual proyectado por CORDEX es mucho menor que los proyectados por CMIP5 y 6. Respecto a la temperatura, CMIP5, CMIP6 y CORDEX pronostican un aumento de la temperatura de para ambas cuencas. Nuevamente es importante resaltar la diferencia que se observa entre las magnitudes correspondiente a CORDEX respecto a CMIP5 y CMIP6.

Contrastando el ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de las pro-

Figura 21

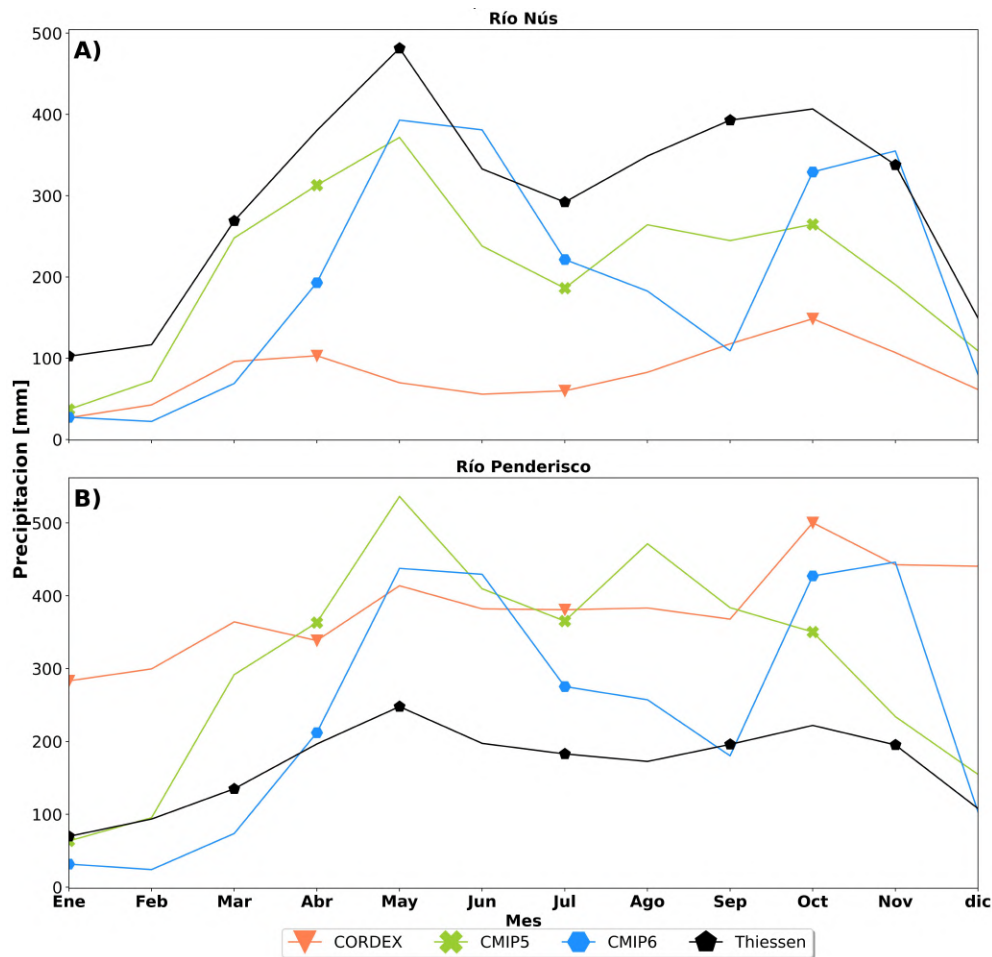
Tendencias de la precipitación y de la temperatura proyectadas por los modelos durante el periodo 2040-2060



yecciones con los calculados por medidas in-situ, en la cuenca del río Nús se proyecta una disminución de la precipitación tanto en CORDEX como en CMIP5 y CMIP6 (Figura 22A). Por el contrario, en la cuenca del río Penderisco se proyecta un aumento de la precipitación en CORDEX, CMIP5 y CMIP6 respecto a la serie de referencia (Figura 22B).

Figura 22

Ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de los modelos contrastado con el ciclo medio mensual obtenido de las mediciones in situ para el periodo 2040 - 2060



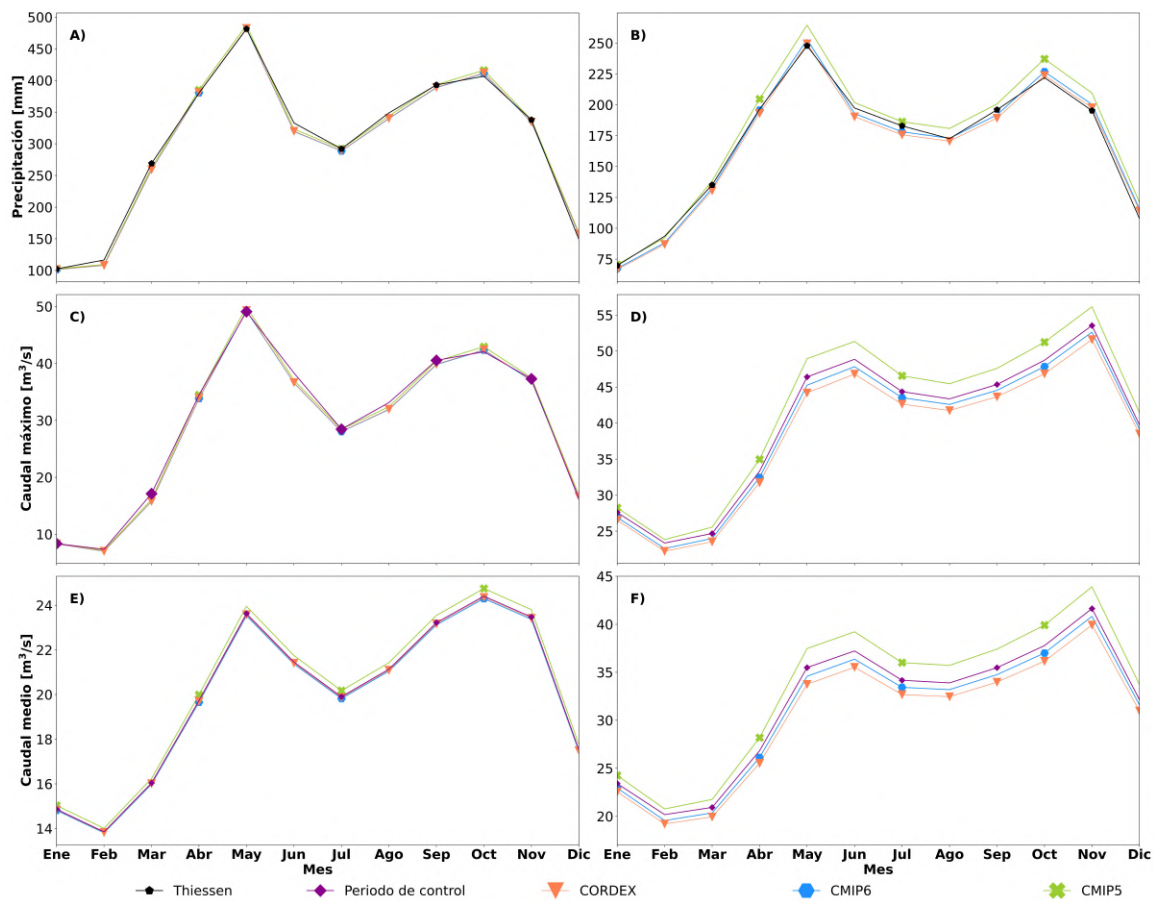
Una vez aplicadas las tendencias sobre las series de precipitación, se observa que sobre la cuenca del río Nús no se evidencian alteraciones significativas en el régimen de precipitación. La serie no se amplifica ni se contrae (Figura 23A). Por el Contrario, en la cuenca del río Penderisco al aplicar las tendencias se observan leves alteraciones en el régimen de precipitación, CMIP6 y CORDEX amplifican los picos de alta y baja precipitación, mientras que CMIP5 genera un aumento de la precipitación durante todos los meses (Figura 23B).

Las series de precipitación alteradas se ingresan a los modelos ya validados y para la cuenca del río Nús se observa que los caudales máximos no sufrieron cambios significativos en su régimen (Figura 23C), a diferencia de los caudales medios donde CMIP5 genera un

aumento de la magnitud del caudal medio durante todo el año (Figura 23E). Para la cuenca del río Penderisco por su parte tanto en caudales máximos y medios se nota un cambio considerable, según las proyecciones de CMIP 5 se espera un aumento del caudal máximo y medio durante todo el año y CMIP 6 y CORDEX prevén una disminución durante todo el año en comparación con el escenario de control (Figura 23D y Figura 23F).

Figura 23

Ciclo medio mensual multianual de precipitación una vez agregada la tendencia a la serie de tiempo original y regímenes de caudales máximos y medios una vez ingresada la precipitación alterada con las tendencias de cambio climático en los modelos para el periodo 2040 - 2060

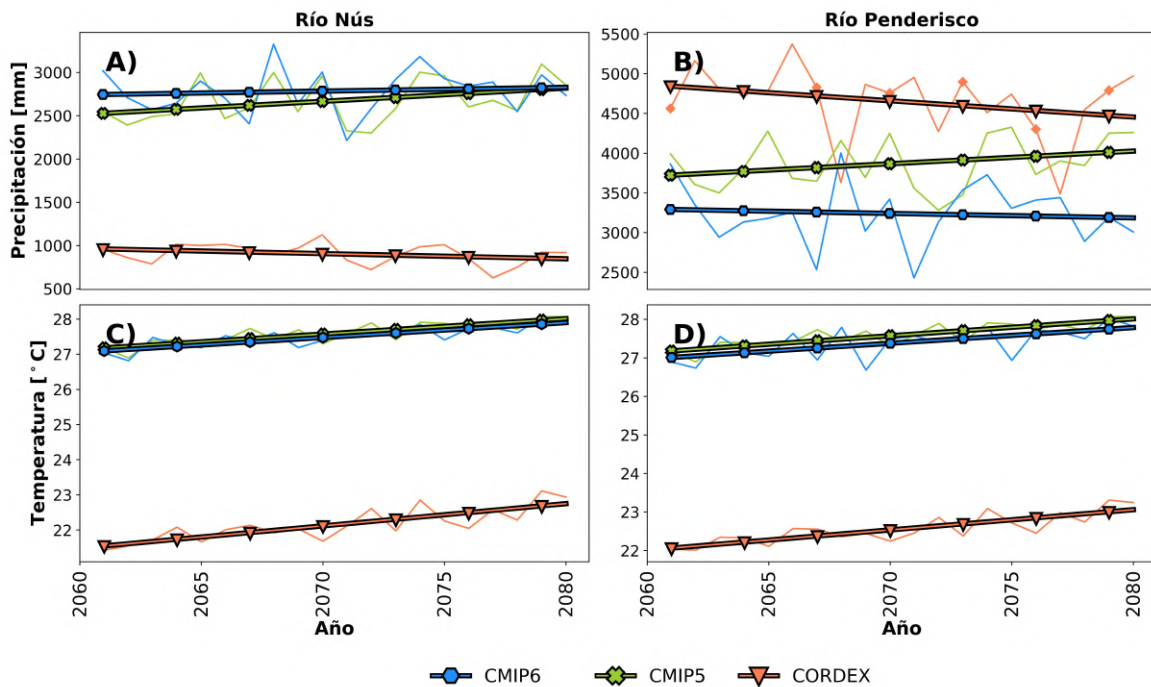


5.4.2 2060 - 2080

Las tendencias de precipitación (Figura 24A y 24B) proyectado por los modelos para este periodo, muestran para la cuenca del río Penderisco, una tendencia de -20,47 mm/año y -5,616 mm/año en la precipitaciones según los resultados obtenidos de CORDEX y CMIP6 respectivamente, mientras que CMIP5 proyecta un aumento de las precipitaciones de alrededor de 15,984mm/año. Para la cuenca del río Nús, CMIP5 y CMIP6 denota una tendencia al aumento de la precipitación de 15,379 y 6,264 mm/año respectivamente, mientras que CORDEX por su parte proyecta una disminución de -6,0048 mm/año en la precipitación. Es importante resaltar nuevamente que en la cuenca del río Nús el acumulado anual proyectado por CORDEX es mucho menor que los proyectados por CMIP 5 y 6. En cuanto a la temperatura, tanto como CMIP 5 y 6 junto con CORDEX mantienen la tendencia del periodo 2040 – 2060 en la cual esta aumenta en las 2 cuencas. Nuevamente es importante resaltar la diferencia que se observa entre las magnitudes correspondiente a CORDEX respecto a CMIP (Figura 24C y 24D).

Figura 24

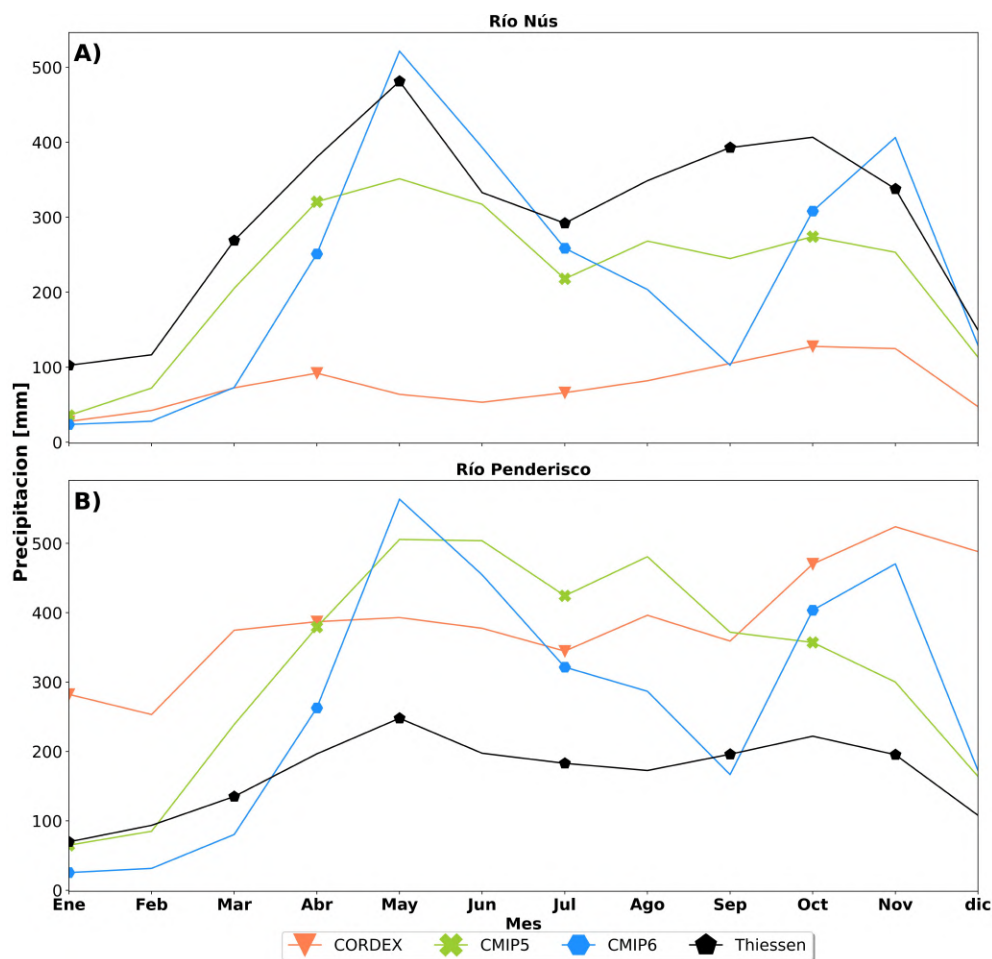
Tendencias de la precipitación y de la temperatura proyectadas por los modelos durante el periodo 2060-2080



Nuevamente, al comparar el ciclo medio mensual multianual obtenido de las proyecciones con los obtenidos de las mediciones en campo, se sigue observando un patrón similar al del periodo anterior, sobre la cuenca del río Nús CMIP5 y CMIP6 proyectan una disminución en la precipitación y CORDEX proyecta una disminución sustancial (Figura 25A). Sobre la cuenca del río Penderisco todos los modelos proyectan un aumento de la precipitación (Figura 25B).

Figura 25

Ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de los modelos contrastado con el ciclo medio mensual obtenido de las mediciones in situ para el periodo 2060 - 2080



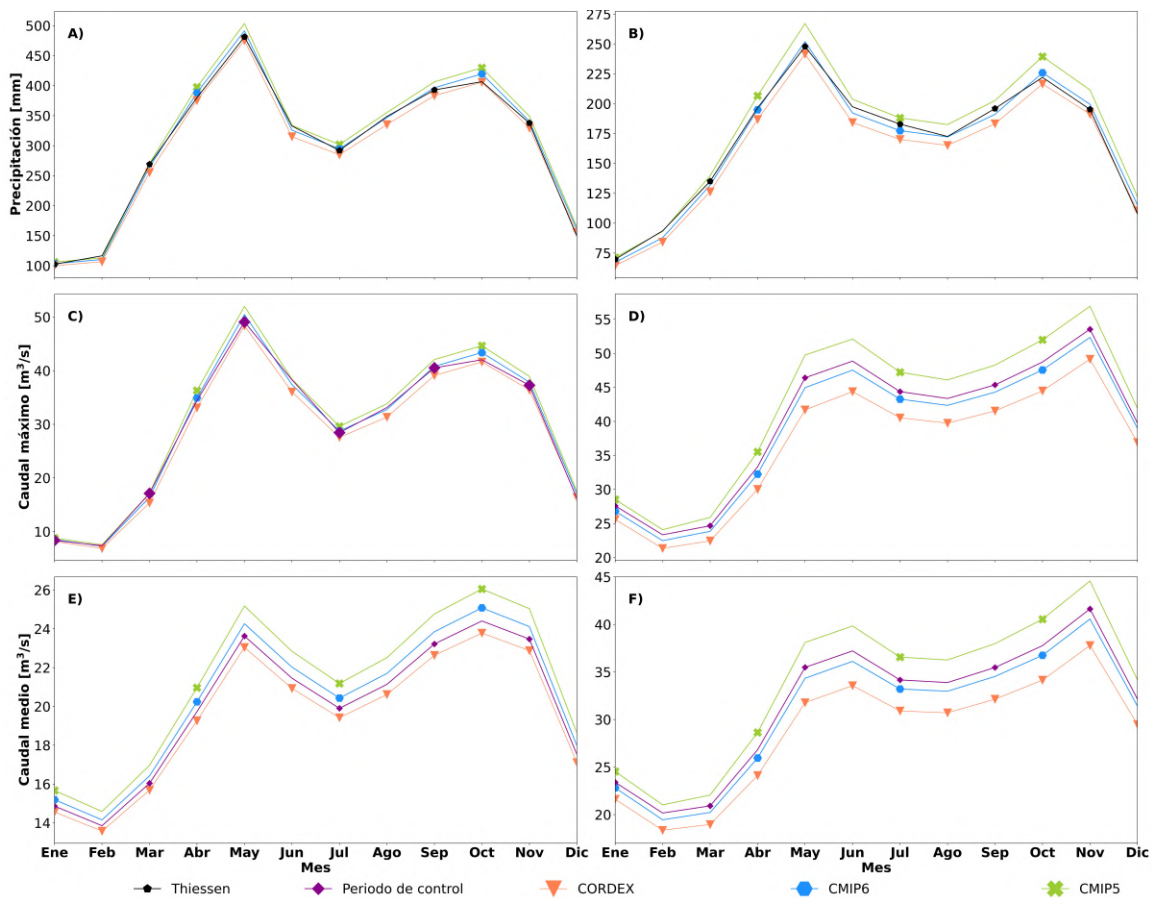
Una vez aplicadas las tendencias sobre las series de precipitación, se observa que sobre la cuenca del río Nus no se evidencia alteraciones significativas en el régimen de precipitación. La serie no se amplifica ni se contrae (Figura 26A). Por el contrario, en la cuenca del río Pen-

derisco al aplicar las tendencias se observan leves alteraciones en el régimen de precipitación, CMIP6 y CORDEX amplifican los picos de alta y baja precipitación, mientras que CMIP5 genera un aumento de la precipitación durante todos los meses (Figura 26B).

Al ingresar las series de precipitación alteradas con las tendencias, para la cuenca del río Nús se observa que CMIP5 proyecta que los caudales máximos de esta se amplifican durante todo el año, CMIP6 por su parte muestra un aumento de los picos de caudal máximo durante el mes de mayo y octubre, mientras que CORDEX pronostica una reducción de los

Figura 26

Ciclo medio mensual multianual de precipitación una vez agregada la tendencia a la serie de tiempo original y regímenes de caudales máximos y medios una vez ingresada la precipitación alterada con las tendencias de cambio climático en los modelos para el periodo 2060 - 2080



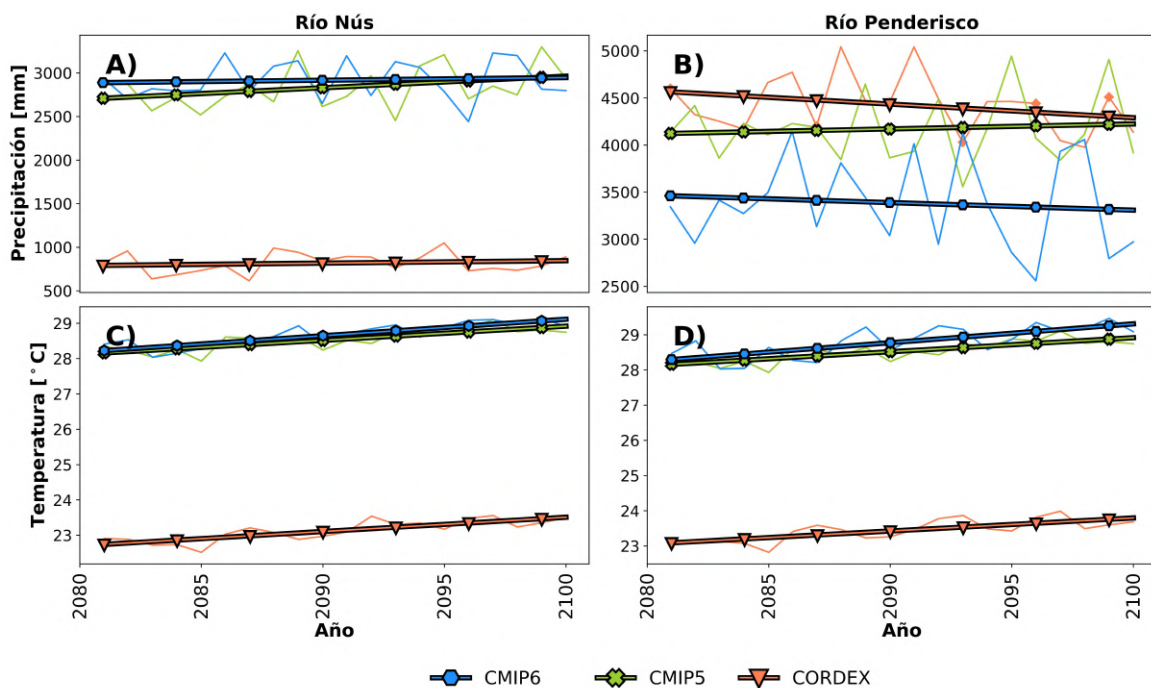
caudales máximos entre los meses de mayo y noviembre (Figura 26C y 26E). Para la cuenca del río Penderisco se mantiene el comportamiento observado en el periodo de 2040-2060, CMIP5 amplifica la serie de caudal durante todo el año, mientras que CMIP6 y CORDEX la contraen, siendo CORDEX la que genera una mayor disminución de los caudales durante todo el año (Figura 26D y 26F).

5.4.3 2080 - 2100

Analizando las tendencias de precipitación (Figura 27A) y temperatura (Figura 27C) proyectado por los modelos, se observa que, para la cuenca del río Nús, CMIP5 y CORDEX denota un aumento de la precipitación de 13.34 y 2.85 mm/año, mientras que CMIP6 evidencia una disminución de la precipitación de -6.9984 mm/año. Es importante resaltar nuevamente que en la cuenca del río Nús el acumulado anual proyectado por CORDEX es menor que los proyectados por CMIP 5 y 6. Para la cuenca del río Penderisco, CORDEX

Figura 27

Tendencias de la precipitación y de la temperatura proyectadas por los modelos durante el periodo 2080-2100

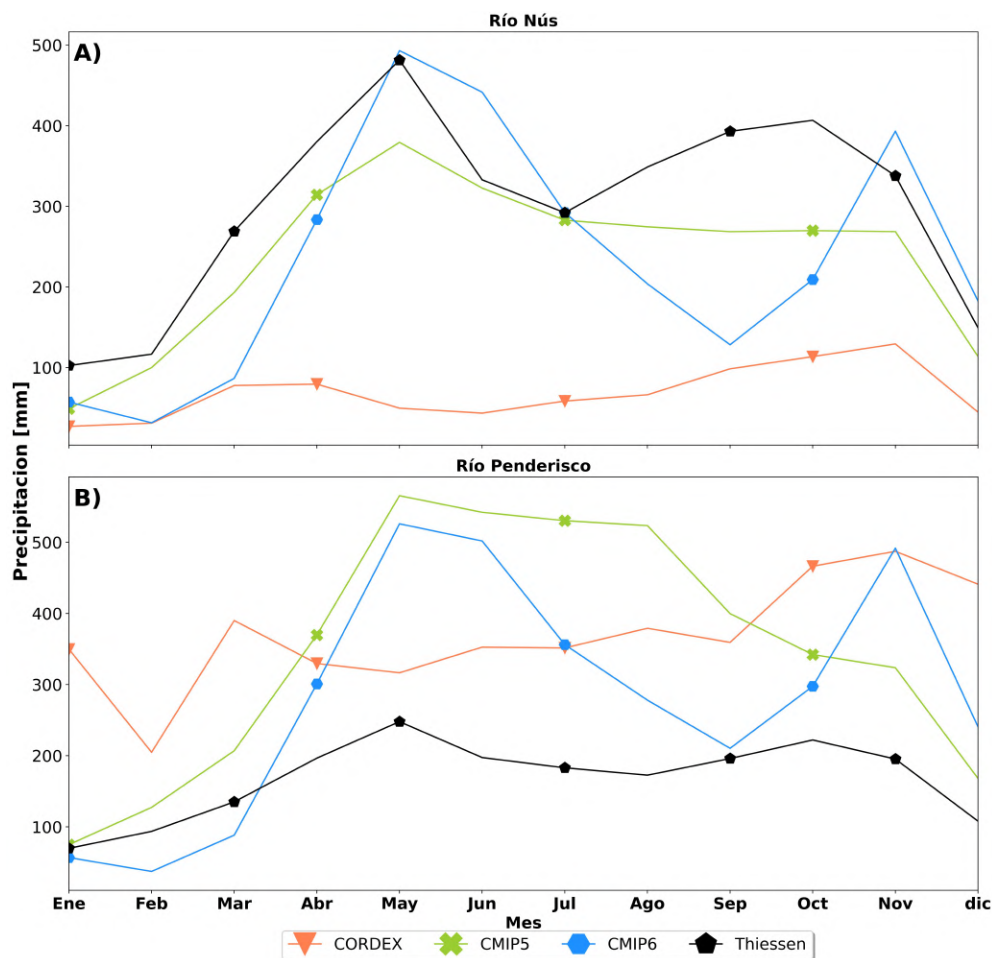


y CMIP6 proyecta una tendencia negativa de -14.42 y -8.03 mm/año y CMIP5 evidencia un de aumento de 5.35 mm/año respecto a la precipitación. La temperatura por su parte mantiene la tendencia observada en los periodos de tiempo anterior, tanto CORDEX como CMIP proyecta un aumento de esta a finales de siglo. Es este periodo de tiempo todavía se observa que CORDEX proyecta valores de temperatura bastante alejados a los entregados por CMIP.

Nuevamente contrastando el ciclo medio mensual multianual obtenido de las proyecciones con mediciones en campo, se sigue observando un patrón similar al de los dos periodos

Figura 28

Ciclo medio mensual multianual de precipitación obtenido de los modelos contrastado con el ciclo medio mensual obtenido de las mediciones in situ para el periodo 2080 - 2100



anteriores. Sobre la cuenca del río Nús CMIP5 y CMIP6 proyectan una disminución de las precipitaciones y CORDEX proyecta una disminución sustancial (Figura 28A). Sobre la cuenca del río Penderisco todos los modelos proyectan un aumento de la precipitación (Figura 28B).

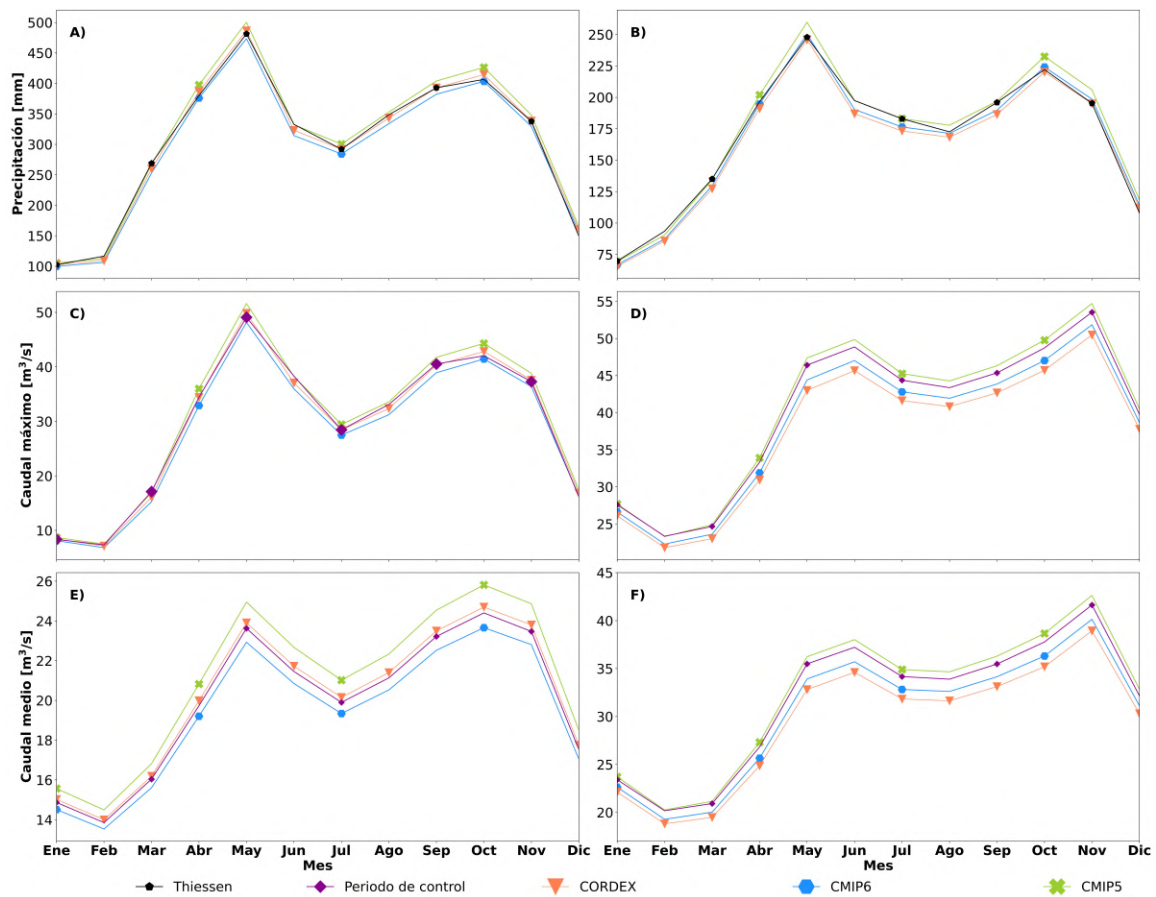
Una vez aplicadas la tendencia sobre las series de precipitación, se observa que sobre la cuenca del río Nús CMIP5 genera que la serie se amplifique levemente durante todos los meses al igual que en el periodo 2060-2080. CMIP6 y CORDEX por su parte no generan afectaciones sobre la serie y esta se ajusta a la curva de referencia (Figura 29A). En la cuenca del río Penderisco al aplicar la tendencia se observa un comportamiento similar al periodo 2060-2080 para CMIP5 en el cual se amplifica la serie durante todo el año. CMIP6 y CORDEX por su parte no generan diferencias marcadas en la serie salvo el periodo entre los meses de junio a septiembre, periodo en el cual se presenta una pequeña contracción de la serie, esta se ajusta a la curva de referencia (Figura 29B).

Al ingresar las series de precipitación alteradas con las tendencias, para la cuenca del río Nús se observa que CMIP5 proyecta que los caudales máximos de esta se amplifican durante todo el año, CMIP6 por su parte muestra una disminución en los picos de caudal máximo durante el mes de mayo y octubre, mientras que CORDEX no presenta cambios frente a la curva de referencia (Figura 29C). Para la cuenca del río Penderisco se mantiene el comportamiento observado en los 2 periodos anteriores, CMIP5 amplifica la serie de caudal durante todo el año, mientras que CMIP6 y CORDEX la contraen, siendo CORDEX la que genera una mayor disminución de los caudales durante todo el año (Figura 29D).

Para lo caudales medio en la cuenca del río Nús se observa un cambio con respecto a periodo los 2 periodos anteriores. En este periodo, CMIP 5 y CORDEX amplifican la serie durante todo el año siendo el primero el que genera el mayor aumento de magnitud, mientras que CMIP6 disminuye la magnitud de los caudales durante todo el año (Figura 29E). Por su parte la cuenca del río Penderisco mantiene el comportamiento de los 2 periodos anteriores, CMIP5 amplifica la serie de caudales durante todo el año y CMIP6 y CORDEX reducen su magnitud, siendo este último el que genera la mayor contracción (Figura 29F).

Figura 29

Ciclo medio mensual multianual de precipitación una vez agregada la tendencia a la serie de tiempo original y regímenes de caudales máximos y medios una vez ingresada la precipitación alterada con las tendencias de cambio climático en los modelos para el periodo 2080 - 2100



5.5 Análisis de frecuencia

Teniendo en cuenta el análisis estadístico realizado a las series de caudales se tiene que para la estación LA MAGDALENA - AUT [11077020] tanto los caudales máximos como medios se ajustaron adecuadamente a una FDP lognormal, mientras que, los caudales para la estación CARAMANTA - AUT [23087160] se ajustaron de manera adecuada a la distribución de valor extremo tipo I o Gumbel (Tabla 12), resultado esperado dado que estas FDP tienden a ajustarse de mejor manera a variables de tipo extremo como lo son los caudales máximos.

Tabla 12

Ajuste de las funciones de distribución de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste

	Ajuste	Prueba χ^2	Prueba Kolmogorov-Smirnov
Q. Máx. LA MAGDALENA - AUT [11077020]	Valor crítico $\alpha = 0,05$	11,070	0,483
	Normal	10,813	0,150
	Lognormal	10,726	0,150
	Valor extremo tipo I o Gumbel	12,770*	0,157
Q. Med. LA MAGDALENA - AUT [11077020]	Valor crítico $\alpha = 0,05$	16,919	0,202
	Normal	6,222	0,072
	Lognormal	5,533	0,036
	Valor extremo tipo I o Gumbel	9,878	0,050
Q. Máx. CARAMANTA - AUT [23087160]	Valor crítico $\alpha = 0,05$	11,070	0,519
	Normal	10,147	0,379
	Lognormal	10,219	0,373
	Valor extremo tipo I o Gumbel	9,593	0,312
Q. Med. CARAMANTA - AUT [23087160]	Valor crítico $\alpha = 0,05$	16,919	0,192
	Normal	19,362*	0,085
	Lognormal	9,746	0,049
	Valor extremo tipo I o Gumbel	6,996	0,041

Nota. * Se rechaza el ajuste a la función de distribución. En negrita se indican las funciones de distribución de probabilidad con ajuste más adecuado y empleadas para el análisis de frecuencia.

De acuerdo con las series de caudales máximos y medios observados para cada una

de las estaciones, solo en la estación LA MAGDALENA - AUT [11077020], específicamente para la serie de caudal máximo diario, ha ocurrido el caudal de mayor magnitud de toda la serie de observaciones más de una vez.

La magnitud de dicho caudal máximo corresponde a 133.047 m³/s que conforme al ajuste de la serie de caudales observados a una FDP Lognormal con un nivel de confianza del 95 %, el periodo de retorno asociado a este sería de aproximadamente 10.8 años.

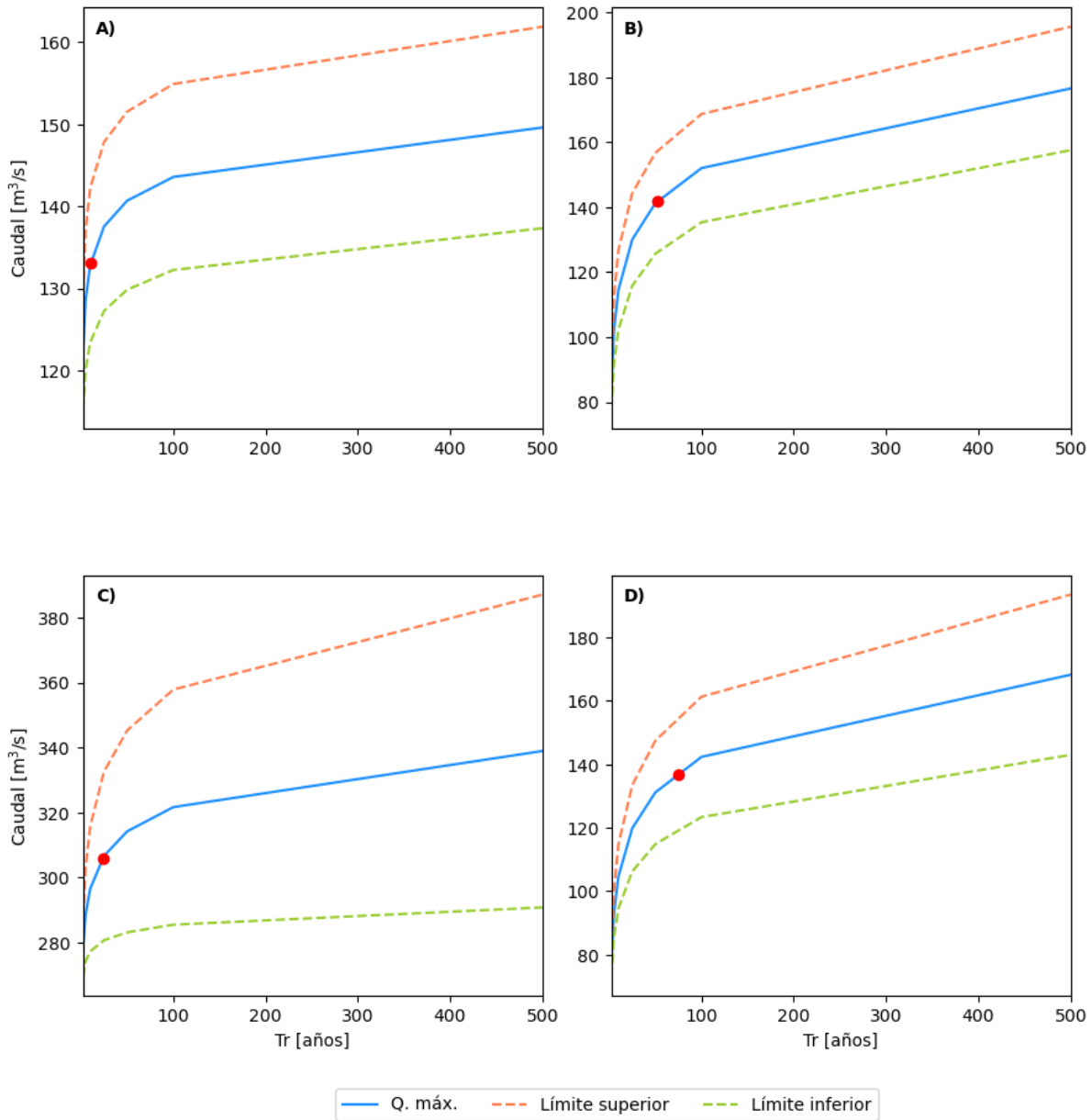
Analizando las fechas de los eventos en las que se alcanzó dicho valor (26/05/2021, 19/05/2022, 11/06/2022, 14/06/2022 y 27/10/2022) se observa que inicialmente el periodo de tiempo entre el primer y segundo evento fue cercano a 1 año, sin embargo, entre los eventos posteriores la frecuencia se reduce a 1 (tercer y cuarto evento) y 3 meses (cuarto y quinto evento).

Si bien los caudales máximos que se han presentado en las observaciones están alrededor de los caudales promedios obtenidos en el análisis de frecuencia es posible que se lleguen a presentar caudales mayores. Los periodos de retorno asociados a los caudales máximos presentados en las series de datos observados, así como el límite superior de estos se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13

Caudales máximos observados y periodos de retorno correspondientes según el ajuste a la FDP

	Caudal [m ³ /s]	Límite superior [m ³ /s]	Periodo de retorno [años]
Q. Max. LA MAGDALENA - AUT [11077020]	133.047	142.496	10.760
Q. Med. LA MAGDALENA - AUT [11077020]	141.800	157.398	52.847
Q. Máx. CARAMANTA - AUT [23087160]	306.000	331.525	24.045
Q. Med. CARAMANTA - AUT [23087160]	136.732	154.359	75.024

Figura 30*Caudales máximos y medios para los ríos Penderisco y Nús*

Nota: A) caudal máximo diario estación LA MAGDALENA - AUT [11077020], B) caudal medio diario estación LA MAGDALENA - AUT [11077020], C) caudal máximo diario estación CARAMANTA - AUT [23087160] y D) caudal medio diario estación CARAMANTA - AUT [23087160]

6 Conclusiones

El modelo GR4J logra representar de manera aceptable la serie de caudales medios diarios y los caudales máximos para el análisis de eventos de riesgo. El valor del criterio de eficiencia fue superior a 0.36 lo cual demuestra su utilidad en las cuencas que se encuentran ubicadas en la región Andina (Durães et al., 2011). Además, al solamente requerir calibrar 4 parámetros es de fácil implementación en comparación con los modelos semi-distribuidos.

El modelo HEC-HMS por su parte, es un modelo robusto en el que es necesario tener claras las características y datos de entrada requeridos por el método de modelación que se requiera utilizar para su correcta implementación, lo anterior depende del objetivo que se desee lograr con el ejercicio de modelación. Del análisis de sensibilidad se concluye que el número de curva y el tiempo de tránsito son los parámetros determinantes en la cuenca del río Nús a la hora de representar de manera correcta las crecientes.

El régimen de precipitación para la cuenca del río Nús es bimodal con pico máximo de precipitación en mayo. Las magnitudes varían entre 100 mm/mes para los meses con mínimo de lluvias (diciembre-enero) y 500 mm/mes (mayo). Por su parte el río Penderisco, aunque coincide con el tipo de régimen, sus magnitudes presentan menor amplitud variando entre 50 y 350 mm/mes aproximadamente.

Los modelos capturan adecuadamente los ciclos de precipitación e identifican el mes de mayo como el máximo de lluvias en ambas cuencas, incluso en los escenarios futuros bajo cambio climático. A futuro, es deseable realizar un ejercicio estadístico o aritmético de corrección de sesgo de los modelos sobre la región de estudio. Sin embargo, es consistente con lo encontrado por Ortega et al., 2021 en su análisis para la región de los Andes tropicales que abarcaría áreas de Colombia con un régimen similar.

La tendencia de precipitación no muestra fuertes señales de decrecimiento o incremento de las precipitaciones a escala mensual o anual. Incluso la magnitud de los modelos difiere leve o significativamente de la observación, estos resultados son consistentes con Magrin et al., 2014 al evidenciar que el signo de la tendencia difiere entre modelos. Sin embargo, articulado al análisis de frecuencias y los modelos con tendencias positivas se podría indicar que los eventos extremos pueden aumentar su frecuencia en el futuro.

La disminución o aumento de la precipitación aplicado a series diarias tiene influencia notoria sobre cambios en los caudales de ambas cuencas siendo las salidas de CMIP5 y

CORDEX las que tienen mayor influencia sobre estos. CMIP5 (CORDEX) da como resultado un aumento (disminución) en el régimen de caudales durante todo el año para los periodos 2040-2060, 2060-2080 y 2080-2100 sobre la cuenca del río Penderisco. El anterior comportamiento también se observa para la cuenca del río Nús diferenciándose en que para el periodo 2040-2060 no se observan cambios importantes en el régimen de caudales de la cuenca con respecto a los caudales observados para ninguna de las salidas de los modelos.

Los caudales máximos y medios para la estación LA MAGDALENA - AUT [11077020] correspondientes a la cuenca del río Penderisco se ajustaron a una distribución Lognormal mientras que los caudales de la cuenca del río Nús asociados a la estación CARAMANTA - AUT [23087160] se ajustaron a una distribución de Valor extremo tipo I o Gumbel.

Según la caracterización morfométrica de las cuencas de interés la cuenca del río Penderisco presenta características que la clasificarían como una cuenca susceptible a avenidas torrenciales, a diferencia de la cuenca del río Nús que posee características que la hacen menos susceptible a este tipo de eventos, sin embargo, de acuerdo con el análisis de frecuencias la cuenca del río Nús está sujeta a caudales máximos de mayor magnitud en comparación con la cuenca del río Penderisco, lo cual puede deberse a que las magnitudes en la precipitación de la cuenca del río Nús son mayores en comparación con las de la cuenca del río Penderisco, además, el área de la cuenca del río Nús es aproximadamente la mitad del área de la cuenca del río Penderisco lo que permite que se puedan generar caudales picos mucho mayores en esta cuenca y por tanto generar eventos extremos como avenidas torrenciales.

Para la cuenca del río Penderisco teniendo en cuenta los caudales observados, al analizar la frecuencia con la que se presenta el caudal máximo diario de mayor magnitud de la serie, se observa una disminución en el periodo de retorno de dicho evento, presentándose este caudal máximo de manera más frecuente.

La red de monitoreo de la cuenca del río Nús presenta un desafío importante a la hora de registrar el nivel del agua dado que en el punto instrumentado se presenta un lecho rocoso característico de la parte alta de la cuenca. Lo anterior puede derivar en cambios naturales en el cauce de la corriente resultado del aumento o disminución del nivel, con lo cual existe el riesgo de que en algún momento se deje de monitorear la corriente adecuadamente, además la selección del punto de monitoreo está sujeto a que exista una estructura (un puente en la mayoría de los casos) que facilite el proceso de instrumentación. Siendo el SAMA una red diseñada con enfoque en gestión del riesgo se prioriza la instrumentación del cauce con un sensor de nivel aguas arriba de la comunidad de interés que se ve afectada, a una distancia

prudente con la cual se pueda generar una alerta que proporcione un tiempo de respuesta adecuado para la comunidad y los entes públicos correspondiente (alcaldía, comité de gestión del riego, etc.), además se refuerza el monitoreo de la parte alta de la cuenca con la instalación de pluviómetros los cuales permitan alertar crecidas del cauce ante eventos de precipitación de gran magnitud. Por último, se requiere acceder a los datos en tiempo real debido a que los eventos de desastres suceden en escala de minutos a horas por lo cual los instrumentos están integrados con telemetría que permiten la transmisión de datos en tiempo real, pero esta tecnología requiere señal de algún operador móvil lo cual en muchos casos es inexistente en la parte alta de la cuenca hidrográfica. Particularmente, para las cuencas de los ríos Penderisco y Nús esta dificultad no se evidenció, no obstante, está presente en otras cuencas hidrográficas priorizadas por el SAMA. Una forma de solventar dicha dificultad se logra con la instalación de amplificadores de señal o accediendo a internet satelital perteneciente a los habitantes de la zona. Teniendo en cuenta lo anterior, se marca una ruta a seguir en diseños o fortalecimiento de redes de monitoreo en el país.

Es importante resaltar la labor del monitoreo de variables hidrometeorológicas ya que para el desarrollo de este trabajo de grado se realizó una búsqueda de información para las cuencas de interés del SAMA y la mayoría de estas contaban con una nula instrumentación de caudal y/o precipitación o poseían un periodo de registro muy corto, una gran cantidad de datos faltantes o una escala temporal superior a la diaria que limita estudios de modelación hidrológica enfocada en gestión del riesgo como este. También es importante resaltar y elogiar la voluntad de instituciones como el IDEAM para mantener activas las estaciones listadas en la Tabla 7 por más de 30 años y que permitieron realizar este estudio, ya que el diseño, operatividad y mantenimiento de la red que permita obtener datos es excesivamente costoso.

Referencias

- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D. y Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in cmip5/cmip6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad De Antioquia* (100), 75–96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>.
- ASF DAAC (2015). *PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res*. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>.
- Basher, R. (2006). *Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 364(1845), 2167–2182. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>.
- Cantoni, E., Trambly, Y., Grimaldi, S., Salamon, P., Dakhlaoui, H., Dezetter, A. y Thiemig, V. (2022). Hydrological performance of the ERA5 reanalysis for flood modeling in Tunisia with the LISFLOOD and GR4J models. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 42, 101–169. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101169>.
- Carvajal, L. F. y Roldán, E. (2007). *Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J Aplicación: cuenca del río Aburrá*. DYNA 74(152), 73–87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/912>.
- Colombia. Congreso de la República. (2012). *Ley 1523 de 2012: por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial.
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE) (2022). Cuencas. <https://www.cornare.gov.co/cuencas/>.
- de la Ossa Doria, M. V. y González Campo, M. J. (2011). Metodología para estimar hidrogramas de crecientes a partir de modelos lluvia-escorrentía empleando HYFRAM y HEC-HMS : caso de estudio: cuenca del Arroyo Matute, localizado en el Departamento de Bolívar (Colombia). <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/2462#page=1>.
- Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN) (2022). Visor geográfico para la gestión del riesgo de desastres en antioquia. <https://dagran.antioquia.gov.co/visor/geografico>.

- Domínguez, E. y Lozano, S. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 38(148), 321–333. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.132>.
- Durães, M. F., de Mello, C. R. y Naghettini, M. (2011). *Applicability of the swat model for hydrologic simulation in Paraopeba River basin, MG*. CERNE 17(4), 481–488. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400006>.
- Erasun, V., Sapriza, G., Failache, N., Gamazo, P., Arcelus, A. y Nardin, A. (2019). Modelación hidrológica para la gestión del riesgo de inundaciones en subcuencas tributarias al río Uruguay. *Aqua-LAC* 11(1), 17–33. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-02>.
- Githui, F., Gitau, W., Mutua, F. y Bauwens, W. (2009). *Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya*. *International Journal of Climatology* 29(12), 1823–1834. <https://doi.org/10.1002/joc.1828>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2019). Plan estratégico de la red hidrológica, meteorológica y ambiental del IDEAM. Informe técnico. <https://bit.ly/3ZBNXeP>.
- Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS) (2001). Mapa geológico del departamento de Antioquia. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040024267/documento/pdf/0101242671101000.pdf>.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2015). Caracterización biofísica, socioeconómica y cultural del entorno regional del complejo de páramos Frontino - Urrao. Informe técnico, CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL URABA CORPOURABA.
- Jaramillo Robledo, A. (2007). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/232>.
- López García, J. D., Carvajal Escobar, Y. y Enciso Arango, A. M. (2017). Sistemas de alerta temprana con enfoque participativo: un desafío para la gestión del riesgo en Colombia. *Luna Azul* (44), 231–246. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.44.14>.
- Magrin, G., Marengo, J., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. y Vicuña, S. (2014). *Central and south america*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

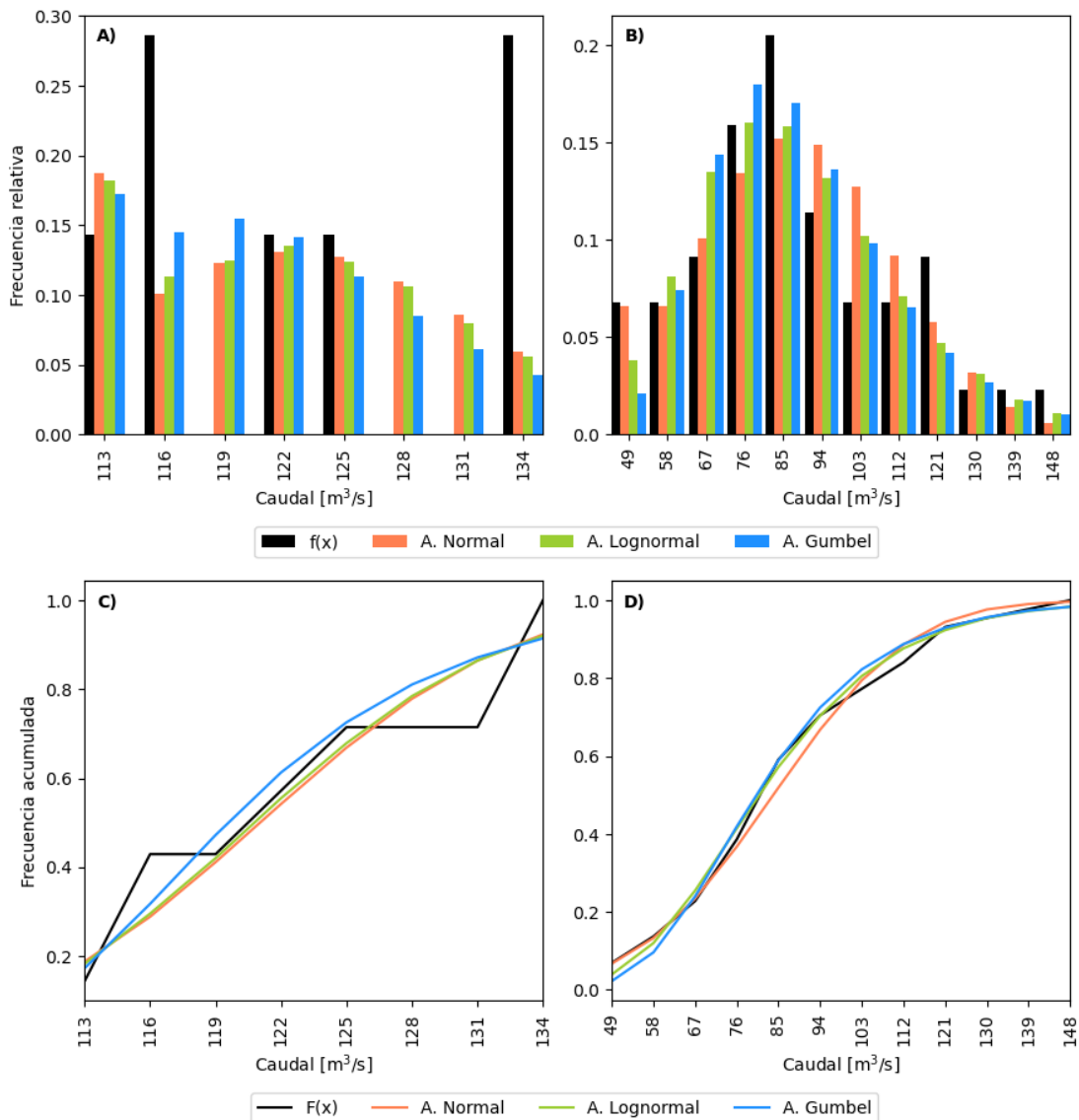
- Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L.White (eds.)], *Capítulo 27*, (pp. 1499–1566). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Marín Muñoz, A. F. (2013). *Modelación del tránsito de crecientes con el HEC-HMS y HEC-RAS en un tramo del Río Medellín*. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/271>.
- Marín Muñoz, A. F. y Barros Martínez, J. F. (2016). *MODELACIÓN DE TRÁNSITO DE CRECIENTES EN EL RÍO ABURRÁ-MEDELLÍN PARA UNA PROPUESTA DE SU RESTAURACIÓN*. *Journal of Hydrology* 13(26), 153–168. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.165>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022). Dirección de gestión integral del recurso hídrico. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/>.
- Mohammadi, B., Safari, M. y Vazifehkhah, S. (2022). IHACRES, GR4J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling. *Sci Rep* 12(12096). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16215-1>.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. *ALFAOMEGA*.
- Naciones Unidas (ONU) (2009). *2009 UNISDR Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. [Archivo PDF]. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf.
- Naqash, T., Ahanger, M. y Maity, R. (2023). *Multi-site hydrometeorological simulation of streamflow for upper Jhelum basin in northwest Himalayas using HEC-HMS soil moisture accounting algorithm*. *Model. Earth Syst. Environ.* 9, 431–455. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01510-7>.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) (2013). Milestones in the history of disaster risk reduction. <https://www.undrr.org/about-undrr/history#idndr>.
- Oleyiblo, J. O. y Li, Z.-J. (2010). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering* 3(1), 14–22. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.002>.

- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A. y Nobre, P. (2021). *Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models*. *International Journal of Climatology* 41(15), 6713–6735. doi:<https://doi.org/10.1002/joc.7221>.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K. y Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci* 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]*. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009325844.
- Perrin, C., Michel, C. y Andréassian, V. (2003). *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation*. *Journal of Hydrology* 279(1), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G. y Alvarez, J. F. (2005). The diurnal cycle of precipitation in the tropical andes of colombia. *Monthly Weather Review* 133(1), 228–240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>.
- Poveda, G. y Mesa, J. (1996). *Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia*. *Hydraulic Engineering in Mexico* 21(1), 21–37. https://www.researchgate.net/publication/233921803_Las_fases_extremas_del_fenomeno_ENSO_El_Nino_y-La_Nina_y_su_influencia_sobre_hidrologia_de_Colombia.
- Programa Integral Red Agua (PIRAGUA) (s.f.). Programa integral red agua – piragua. <https://piragua.corantioquia.gov.co/piragua/>.
- Ramly, S. y Tahir, W. (2016). Application of HEC-GeoHMS and HEC-HMS as Rainfall-Runoff Model for Flood Simulation. In: Tahir, W., Abu Bakar, P., Wahid, M., Mohd Nasir, S., Lee, W. (eds) ISFRAM 2015. *Springer* 3(1). https://doi.org/10.1007/978-981-10-0500-8_15.

- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N. y Rafaj, P. (2011). *RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions*. *Climatic Change* 109(33), 3461–3482. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
- Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) (2010). *Redes*. https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/monitoreo#meteorologicas.
- Sánchez San Roman, J. (2015). *HEC - HMS. Manual elemental*. <https://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf>.
- Te Chow, V., Maidment, D., Mays, L. y Saldarriaga, J. (1993). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill. isbn: 9789586001717.
- Tian, Y., Xu, Y. y Zhang, X. (2013). *Assessment of Climate Change Impacts on River High Flows through Comparative Use of GR4J, HBV , AND Xinanjiang Models*. *Water Resour Manage* 27, 2871–2888. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0321-4>.
- Traore, V. B., Sambou, S., Tamba, S., Fall, S., Diaw, A. T. y Cisse, M. T. (2014). *Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River*. *American Journal of Environmental Protection* 3(1), 36–44. [10.11648/j.ajep.20140301.15](https://doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15).
- UNDRR (2022). *Acerca de desinventar*. <https://www.desinventar.org/>.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) (2016). *Guía para la implementación de sistemas de alerta temprana*. Technical report, Bogotá, D.C. <https://online.pubhtml5.com/pxou/sfhj/index.html#p=1>.
- Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (UNAL) (2018). *Evaluación de la susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo ante avenidas torrenciales en el departamento de antioquia y definir umbrales críticos de lluvia para un sistema de alerta temprana*. Informe técnico, DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DEL SISTEMA DE PREVENCIÓN, ATENCIÓN Y RECUPERACIÓN DE DESASTRES - DAPARD, Medellín.
- US Army Corps Of Engineers (2021). *HEC - HMS User's Manual*. https://users.auth.gr/vmarios/courses/DPMS/HEC-HMS/HEC-HMSUsersManual-v41-20210316_023441.pdf.
- Vélez Otálvaro, M. V. (2000). *Hidrología para ingenieros*.

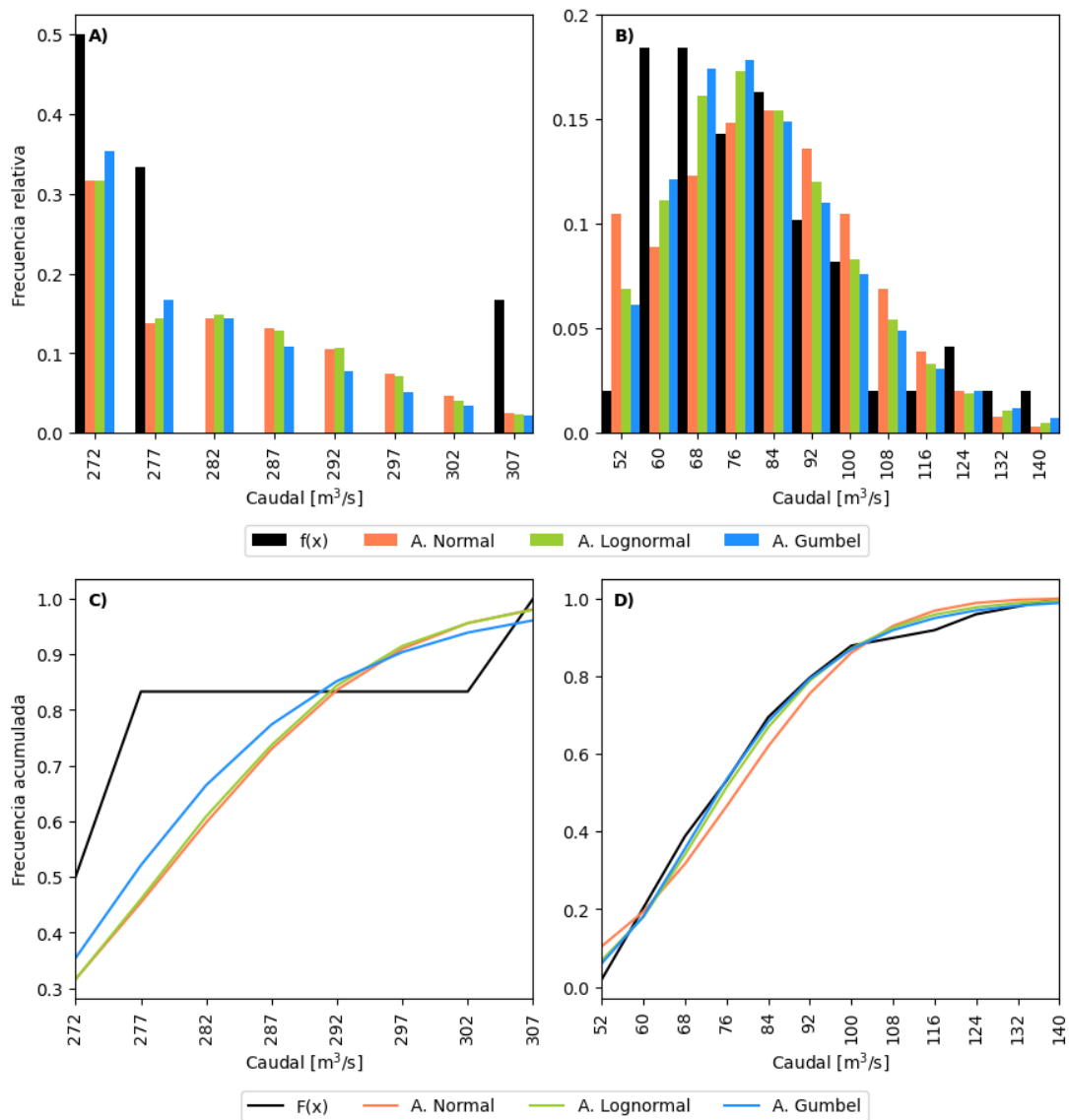
Anexos

Anexo 1. Ajustes a las FDP para las series de caudales de la estación LA MAGDALENA - AUT [11077020]



Nota: A) Ajuste de la frecuencia relativa de los caudales máximos diarios y B) medios diarios. C) Ajuste de la frecuencia acumulada de los caudales máximos diarios y D) medios diarios.

Anexo 2. Ajustes a las FDP para las series de caudales de la estación CARA-MANTA - AUT [23087160]



Nota: A) Ajuste de la frecuencia relativa de los caudales máximos diarios y B) medios diarios. C) Ajuste de la frecuencia acumulada de los caudales máximos diarios y D) medios diarios.