

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL CAUDAL APROVECHABLE EN
PROYECTOS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS BAJO ESCENARIOS
DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA**



María Jimena Paredes Guevara

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL CAUDAL APROVECHABLE EN
PROYECTOS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS BAJO ESCENARIOS
DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA**

MARÍA JIMENA PAREDES GUEVARA

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAESTRÍA EN
HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA**

Director

Ing. M. Sc. Mauricio Aguirre Gómez

UNIVERSIDAD DEL CAUCA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

POPAYÁN

El director y los jurados han evaluado este documento titulado: “Metodología para determinar el caudal aprovechable en proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas bajo escenarios de variabilidad climática”, han escuchado la sustentación por parte de la autora y han aprobado el trabajo, por lo que se autoriza a la estudiante María Jimena Paredes Guevara para que adelante las gestiones administrativas para obtener el título de Maestría en Ingeniería Hidráulica e Hidrológica.

Director: MSc. Mauricio Hernán Aguirre Gómez

Jurado 1: Dr. Carlos Alfonso Zafra Mejía

Jurado 2: Mag. Silvio Manuel Terán Rosero

La vida no es para impresionar, es para impresionarse. El conocimiento es infinito y llama a la humildad y a la modestia intelectual.

A mis amores

Agradezco a mi director de tesis por su guía y apoyo. Al doctor Mauricio Gómez por su inmensa colaboración y paciencia con la construcción del corazón de este ejercicio. Al Ingeniero Carlos Gallardo quien siempre ha tenido fe en mí y me alentó a involucrarme en el estudio de esta maestría. A la Universidad del Cauca y su Facultad de Ingeniería Civil por facilitar los recursos para que esto se llevara a cabo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA.	1
3. JUSTIFICACIÓN.	3
4. OBJETIVOS.	4
4.1 General.	4
4.2 Específicos.	4
5. MARCO TEÓRICO.	5
5.1 Tipos de centrales hidroeléctricas.	5
5.2 Caudales aprovechables.	7
5.3 Caudal de generación.	8
5.4 Caudales y variabilidad climática.	8
5.5 Métodos para determinar la variabilidad climática.	10
5.6 Experiencias en la determinación de caudales para generación.	13
5.7 Series de tiempo. Modelos ARIMA.	14
5.8 Energía Total producida y Factor de Planta.	17
5.9 Potencia.	18
5.10 Normas y leyes aplicables sobre aprovechamiento hidroeléctrico en Colombia.	18
6. MATERIALES Y MÉTODOS.	19
6.1 Descripción del lugar de estudio.	19
6.2 Revisión bibliográfica.	20
6.3 Recolección de información hidrometeorológica.	21
6.4 Tratamiento de datos hidrometeorológicos.	22
6.5 Determinación de la variabilidad climática y anomalías.	22
6.6 Análisis de series de tiempo.	23
6.7 Construcción de Curvas de Duración de Caudales y valoración de la potencia, energía y factor de planta en la PCH.	23
6.8 Construcción y evaluación de la metodología propuesta.	23
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	24

7.1 Identificación de las metodologías usadas en el ámbito mundial para la determinación de los caudales aprovechables en proyectos PCH.	24
7.2 Estadística descriptiva y exploratoria, variables hidroclimatológicas: Cauce, Cuenca, Océano Pacífico.	27
7.3 Variabilidad climática. Periodos de anomalías e índice SPI.	28
7.4 Resultados Modelado ARIMA.	31
7.5 Curva de duración de Caudales, escenarios de variabilidad y caudal aprovechable.	41
7.6 Potencia, energía y factor de planta.	45
7.7 Propuesta de metodología para determinar el caudal aprovechable en proyectos de PCH, bajo escenarios de variabilidad climática.	52
7.8 Validación de la metodología, Estación El Cortijo. Silvia – Cauca.	53
8. CONCLUSIONES.	67
9. RECOMENDACIONES.	69
10. BIBLIOGRAFÍA.	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de central hidroeléctrica con embalse.	6
Figura 2. Esquema de central hidroeléctrica con derivación.	6
Figura 3. Zonificación del Pacífico Ecuatorial para Determinación del fenómeno ENOS.	12
Figura 4. Patrones teóricos de FAC y FACP.	16
Figura 5. Representación gráfica de la energía firme y la energía secundaria.	17
Figura 6. Municipio de Totoró. Sub Cuenca río El Cofre.	20
Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología.	24
Figura 8. Anomalías de temperatura del Océano Pacífico en la zona 3.4.	29
Figura 9. Índice ONI.	29
Figura 10. Caudal medio mensual en la estación Totoró e índice ONI.	30
Figura 11. Índice de Precipitación Estándar SPI, para la corriente del río El Cofre. Estación Totoró.	30
Figura 12. Índice de Precipitación Estándar SPI y caudal en la corriente El Cofre.	31
Figura 13. Autocorrelogramas Simple y Parcial. Caudal medio mensual en logaritmos.	32
Figura 14. Serie de caudales registrados y simulados con el modelo SARIMAX (14,0,13).	39
Figura 15. Caudal medio mensual registrado en la estación Totoró e índice ONI.	40
Figura 16. Caudal medio mensual simulado por el modelo SARIMAX (14,0,13) e índice ONI.	40
Figura 17. Serie histórica y simulada de caudales para la fuente río El Cofre.	41
Figura 18. Curva de duración de caudales comparada. Históricos registrados, caudales simulados.	42
Figura 19. Potencia, energía y factor de planta para los escenarios históricos de variabilidad EO.	45
Figura 20. Potencia, energía y factor de planta para el escenario de variabilidad La Niña, EOH.	47
Figura 21. Potencia, energía y factor de planta para escenarios simulados. ESA.	48

Figura 22. Energía potencia y factor de planta para máximo rendimiento. Sub escenarios 1 y 2 de restricción de caudal.	50
Figura 23. Energía potencia y factor de planta para potencia hidráulica. Sub escenarios 1 y 2 de restricción de caudal.	51
Figura 24. Metodología propuesta.	52
Figura 25. Ubicación de la estación limnimétrica EL Cortijo. Silvia Cauca.	53
Figura 26. Serie histórica de caudales medios mensuales en la estación El Cortijo. Código 26027090.	54
Figura 27. Correlograma para la serie de Caudales Medios Mensuales en la Estación El Cortijo, Municipio de Silvia-Cauca.	55
Figura 28. Serie histórica y simulada de caudal en la estación El Cortijo.	57
Figura 29. Serie de Caudales y límites de variación no extraordinarios de la serie.	57
Figura 30. Curva de Duración de Caudales para escenarios de variabilidad.	58
Figura 31. Potencia, energía y factor de planta para el escenario de variabilidad histórico registrado, EO.	59
Figura 32. Potencia, energía y factor de planta para los escenarios de variabilidad La Niña. EOH.	61
Figura 33. Potencia, energía y factor de planta para los escenarios Simulado. ESA.	63
Figura 34. Gráficos comparativos para los escenarios de variabilidad y potencia para máximo rendimiento. Río Piendamó.	65
Figura 35. Gráficos comparativos para los escenarios de variabilidad y potencia para caudal aprovechable. Río Piendamó.	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de centrales hidroeléctricas. Clasificación	7
Tabla 2. Índices para determinar variabilidad climática	11
Tabla 3. Valores del Índice normalizado de precipitación y clasificación del periodo.	13
Tabla 4. Documentos encontrados y evaluados en la revisión bibliográfica.	21
Tabla 5. Métodos Hidrológicos para Determinar el Caudal Aprovechable - Caudal de Servidumbre (Qs) o Ambiental- en Proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas PCH.	26
Tabla 6. Correlaciones: Temperatura Media del Océano Pacífico Zona 3 y Caudal medio Mensual.	27
Tabla 7. Correlaciones: Temperatura Media del Océano Pacífico Zona 3.4 y Caudal Medio mensual.	28
Tabla 8. Resultados del test de raíces Unitarias de Dickey-Fuller.	32
Tabla 9. Posibles modelos ARIMA.	33
Tabla 10. Estadísticos del Modelo ARIMA (24,0,24) en logaritmos.	34
Tabla 11. Estadísticos del Modelo SARIMA (14,0,13).	35
Tabla 12. Estadísticos del Modelo SARIMAX (14,0,13) Temperatura zona 3.4 como variable exógena.	37
Tabla 13. Resultados estadísticos de los modelos ARIMA considerados.	38
Tabla 14. Relación de Caudales Medios Mensuales Multianuales para escenarios de variabilidad históricos y simulados. El Cofre.	43
Tabla 15. Escenarios de variabilidad.	44
Tabla 16. Caudal aprovechable para cada escenario de variabilidad.	44
Tabla 17. Valores de energía, potencia y factor de planta para escenarios históricos EO-1 y EO-2.	46
Tabla 18. Valores de energía, potencia y factor de planta para los escenarios La Niña: EOH-1, EOH-2.	48
Tabla 19. Valores de energía, potencia y factor de planta para escenarios simulados. ESA-1 y ESA-2.	49

Tabla 20. Correlaciones. Temperatura del océano Pacífico y caudal en la estación El Cortijo. Silvia Cauca.	54
Tabla 21. Estadísticos para el modelo SARIMAX (14,0,12) temperatura zona 3.4 del Océano Pacífico.	56
Tabla 22. Caudal aprovechable para cada escenario de variabilidad. Rio Piendamó.	58
Tabla 23. Energía, potencia y factor de planta para la serie simulada. Escenarios EO-1 y EO-2.	60
Tabla 24. Valores de energía, potencia y factor de planta para la serie La Niña. Escenarios EOH1 EOH2.	62
Tabla 25. Valores de energía, potencia y factor de planta para la serie simulada. Escenarios ESA-1 y ESA-2.	64

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación forma estocástica de un modelo ARIMA (p,d,q) (1)	15
Ecuación función de autocorrelación (FAC) (2)	16
Ecuación Energía (3)	18
Ecuación Energía Firme (4)	18
Ecuación Energía Secundaria (5)	18
Ecuación del Modelo y gráficos de la serie simulada ARIMA (24,0,24) (6)	34
Ecuación del modelo y gráficos de la serie simulada SARIMA (14,0,13) (7)	36
Ecuación del modelo y gráficos de la serie simulada SARIMAX (14,0,13) (8)	37
Ecuación caudal ambiental conservador (9)	44
Ecuación para el modelo SARIMAX (10)	56

RESUMEN

Este estudio aborda el tema del caudal aprovechable en pequeñas centrales hidroeléctricas y plantea una metodología para considerar los efectos de la variabilidad climática interanual en el lugar del emplazamiento de un posible desarrollo hidroeléctrico. Para establecer las condiciones de variabilidad se determinó la correlación estadística entre variables climatológicas como la temperatura media del Océano Pacífico ecuatorial y las hidrológicas en la fuente estudiada, dado que es el fenómeno llamado El Niño Oscilación del Sur, ENOS, el que afecta mayormente el clima en la Región Andina Colombiana en donde se encuentra el río El Cofre, corriente escogida para el análisis. Por los resultados de correlación estadística significativa se construyó un modelo Auto Regresivo Integrado de Medias Móviles, ARIMA, para explicar los caudales en la fuente y lograr un modelo sintético para la evaluación de escenarios y sus consecuencias sobre la Curva de Duración de Caudales, lo que permitió determinar los escenarios más significativos para evaluar el efecto de la variabilidad sobre los valores de energía producida y factor de planta para la potencia hidráulica y aquella para máximo rendimiento en una Pequeña Central Hidroeléctrica. Los resultados obtenidos permiten identificar las variaciones en el caudal que hacen pensar en posibles estrategias de adaptación para optimizar la operación de la PCH en contextos de variabilidad climática.

Palabras clave: variabilidad climática, caudal aprovechable, modelos ARIMA, generación de energía.

ABSTRACT

This study addresses the topic of usable flow in small hydroelectric plants and proposes a methodology for considering the effects of interannual climate variability at the site of a potential hydroelectric development. To establish the conditions of variability, the statistical correlation between climatological variables such as the average temperature of the equatorial Pacific Ocean and the hydrological variables at the studied source was determined, given that the phenomenon known as El Niño-Southern Oscillation (ENSO) predominantly affects the climate in the Colombian Andean Region where the El Cofre River, the chosen stream for analysis, is located. Based on the results of significant statistical correlation, an Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) model was constructed to explain the flows at the source and achieve a synthetic model for the evaluation of scenarios and their consequences on the Flow Duration Curve. This allowed for the selection of the most significant scenarios to evaluate the effect of variability on the values of energy produced and the plant factor for hydraulic power and that for maximum performance in a Small Hydroelectric Plant. The results obtained allow for the identification of flow variations that suggest possible adaptation strategies to optimize the operation of the SHP in contexts of climate variability.

Keywords: climate variability, usable flow, ARIMA models, power generation.

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se constituye en el resultado del trabajo de investigación denominado Metodología para Determinar el Caudal Aprovechable en Proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Bajo Escenarios de Variabilidad Climática, desarrollado durante el estudio de la Maestría en Ingeniería Hidráulica e Hidrológica ofrecida por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca desde el Departamento de Hidráulica, cursada en la modalidad de Investigación. El tema concerniente al estudio resultó del interés personal, guiado por la importancia que en el momento representa la generación de energías limpias para el mundo y en la consideración de que Colombia es un país rico en recursos hídricos (Alejandro Camacho Botero, 2020), susceptibles de ser aprovechados, pero que pueden ser afectados por procesos de variabilidad climática que es necesario cuantificar.

Los estudios realizados en los últimos tiempos han considerado el efecto del cambio climático y cómo los posibles escenarios globales de cambio influirían en el desarrollo y la estabilidad o supervivencia del ser humano, pero en muy pocos se ha considerado el efecto de la variabilidad climática interna y sus repercusiones en proyectos de aprovechamiento para fines de generación de energía hidroeléctrica. La incertidumbre asociada a los resultados predictivos en estos escenarios está ligada a tres elementos básicamente: la incertidumbre sobre el escenario futuro de emisión de gases, la incertidumbre dependiendo del modelo de proyección usado y la incertidumbre por la variabilidad climática. Se ha demostrado que la variabilidad interna puede incrementar la incertidumbre hasta en un 38% por lo que no debería ser despreciada (Schwarzwald et al., 2022).

La variabilidad climática es un concepto amplio que tiene en cuenta los cambios en el estado del tiempo en múltiples escalas. En este trabajo se consideró la variabilidad interanual representada en los cambios sufridos en variables hidrometeorológicas como el caudal y la precipitación en la zona de estudio. Las corrientes globales y las modificaciones en la temperatura de la atmósfera y de los océanos fomentan la variabilidad y sus consecuencias dependen de la región del planeta de que se trate. Existen fenómenos como el ENSO, El Niño Oscilación del Sur, entre otros, que provoca períodos húmedos y secos por fuera de los rangos considerados normales que pueden ser cuantificados de diversas maneras, una de ellas es a partir de la información suministrada por la NOAA, que determina la aparición o no de la anomalía a partir del índice ONI (Índice de El Niño Oceánico).

El ejercicio desarrollado se plasma en este documento que está estructurado en nueve títulos principales. En primer lugar, se aborda el problema materia de estudio y su justificación. A continuación, se presentan los objetivos, general y específicos a ser cumplidos; el marco teórico que proporciona el contexto y las bases conceptuales necesarias para su ejecución. La metodología que describe el enfoque y los métodos utilizados para llevar a cabo la investigación y los resultados donde se detallan los hallazgos obtenidos, seguidos de las conclusiones que sintetizan los puntos clave del estudio, y finalmente un capítulo de recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aumento de la población mundial demanda cada vez mayor cantidad de bienes y servicios (Johannessen & Shalina, 2022). La disponibilidad de energía eléctrica en una comunidad se constituye en un indicador de bienestar social; existe una creciente demanda de energía para soportar el desarrollo de comunidades, aisladas o interconectadas a una red, para procurar la mejora en su

calidad de vida, seguridad y productividad (Bu, Wang, Qiu, & Möst, 2022) (Njoh et al., 2022). La merma natural en las reservas de combustibles fósiles, los altos costos de explotación y beneficio, así como la afectación medioambiental producida por su uso en diferentes ámbitos de la vida del planeta, llevan a la necesidad inminente de encontrar nuevas formas de suplir los requerimientos energéticos de la población mundial enfocándose en generar el menor impacto posible al medio ambiente, logrando desarrollos sostenibles y sustentables (Bu et al., 2022)(Castrejon-Campos, 2022)(Catolico, Maestrini, Strauch, Giusti, & Hunt, 2021).

Los grandes embalses usados en la historia para desarrollar un potencial eléctrico son ahora conocidos por sus impactos sociales y ambientales muchas veces negativos (Fearnside, 2016), lo que implica cambios en las concepciones arraigadas de eficiencia hidroeléctrica y llama a tener en cuenta criterios sostenibilidad y conservación del ecosistema, novedosos en muchos ámbitos. Un proyecto hidroeléctrico es complejo en todas sus dimensiones y su prefactibilidad dependerá principalmente del cauce a ser aprovechado, del estado de la subcuenca y de su capacidad para ofrecer caudal, y de las características topográficas de la zona de implantación de este (Tuna, 2013). Siempre deberán tenerse en cuenta los efectos sociales, económicos y técnicos ambientales, que permitan determinar un potencial a instalar (Almeida et al., 2022) (Meza-Prieto & Aparicio, 2018) (Ma, Luo, Yang, Lu, & Fan, 2019) (Fearnside, 2016). Establecer el rango de caudal aprovechable es el factor decisivo al momento de definir la viabilidad económica de un proyecto de generación hidroeléctrica (Fanaian, Graas, Jiang, & van der Zaag, 2015).

Existen restricciones de uso en cuanto al caudal de agua para todo proyecto hidroeléctrico que dependen de los servicios ecosistémicos prestados por el cauce, con especial interés sobre la sostenibilidad aguas abajo del punto de implantación del mismo (Kałuza et al., 2022) (Ray & Sarma, 2011) (Huy, Xuan, Van, & Le, 2021). Determinar los rangos de uso de caudal para lograr la integridad del ecosistema es una de las condiciones técnicas para obtener la aprobación del proyecto, su construcción y posterior puesta en funcionamiento, incluso en años con anomalías climáticas, (Paredes-Arquiola, Solera, Martinez-Capel, Momblanch, & Andreu, 2014). Esto obliga a evaluar la oferta hídrica para estructuras de tipo convencional con grandes reservorios o centrales de agua fluyente con derivación, como las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs) a filo de agua, llamadas así por la magnitud de la potencia instalada (Basso, Lazzaro, Bovo, Soulsby, & Botter, 2020). Esta capacidad hídrica y por ende de generación, se puede ver afectada por fenómenos de variabilidad climática o por el cambio climático si las alteraciones ocurren en un plazo mayor, al modificarse el régimen de lluvias por cambios en la temperatura, pudiendo presentarse un incremento en la frecuencia y severidad de los eventos hidrometeorológicos extremos con consecuencias desconocidas y difíciles de evaluar sobre la variable caudal, determinante en un proyecto hidroeléctrico. Las afectaciones sobre las variables meteorológicas y sus consecuencias sobre las diferentes actividades económicas no son las mismas y muchas veces el resultado sobre las variables mencionadas muestra situaciones contrarias en un mismo territorio (de Jong et al., 2021) (Uamusse, Aljaradin, Nilsson, & Persson, 2017).

Existen diversos métodos para determinar el caudal mínimo que puede usarse para cualquier tipo de explotación. En Colombia se usó un método empírico, muy simplificado, que consistía en calcular el 25% del caudal medio diario y ese valor se definía como el límite de uso; otro método utiliza la Curva de Duración de Caudales para determinar los correspondientes a los percentiles 75 u 85 de la curva, dependiendo del Índice de Regulación Hídrica (IRH) que resulte para la cuenca, metodología de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), pero ninguno de estos tiene en cuenta el efecto de la variabilidad climática en su determinación. En otros lugares utilizan, por ejemplo, el 7Q10 como caudal mínimo de conservación, entre otros (Młyński, Operacz, & Wałęga, 2020).

Algunos lineamientos pueden ser considerados insuficientes para la sostenibilidad ecológica del cauce, otros, por el contrario, ser en exceso restrictivos y por ende limitantes para la viabilidad de un proyecto (Fanaian et al., 2015) (X. run Zhang, Zhang, & Ding, 2021) (Basso et al., 2020). No se tienen criterios claros, bien fundamentados, ni una discusión juiciosa sobre los principios que sustentaron esas metodologías y sin un conocimiento de fondo al respecto el desarrollo de la generación hidroeléctrica, indispensable para el progreso social y económico de un país, puede verse ralentizada y disminuida respecto de lo que potencialmente podría generarse. Las condiciones medioambientales y de viabilidad económica de un proyecto bajo la perspectiva del cambio climático y sus afectaciones sobre la variabilidad climática de una zona, influenciarán los procesos de planeación y las decisiones futuras.

En la corriente del río el Cofre, en la zona de Malvazá, ubicada al nor-orienté de la capital del departamento del Cauca, existen características propicias para establecer un desarrollo hidroeléctrico a pequeña escala. Se dispone de información de 60 años de registros de caudal medio diario (1961 – 2020), correspondiente a la estación limnigráfica Totoró, y la topografía permite una caída de al menos 100m. El análisis preliminar sobre el potencial eléctrico a instalar demuestra que la fuente tendría capacidad para una producción permanente de energía, que podría ser incrementada si se ajustara el valor de caudal mínimo, reduciendo sus exigencias después de ser evaluadas bajo condiciones de variabilidad climática como las provocadas por el fenómeno ENOS, entre otras (Widén, Renöfält, Degerman, Wisaeus, & Jansson, 2021). Definir un método para determinar el caudal para generación de energía en pequeñas centrales hidroeléctricas, con base en el análisis de caudales medios diarios o mensuales y teniendo en consideración los efectos producidos por los fenómenos de variabilidad climática, permitirá un desarrollo hidroeléctrico rentable, manteniendo el equilibrio socio-ambiental aguas abajo de la PCH (Arai, Toyoda, & Kazama, 2022) (J. Zhang, Xu, Yu, & Li, 2014) (Almeida et al., 2021). Por consiguiente, este trabajo pretende solucionar la pregunta, ¿Cuáles son los elementos a tener en cuenta para definir una metodología que permita determinar el caudal aprovechable para el establecimiento de pequeños proyectos hidroeléctricos bajo la perspectiva de la variabilidad climática?

3. JUSTIFICACIÓN

La energía hidroeléctrica ha sido la principal forma de producción a nivel global, tanto que contribuye con el 16% de la producción total. Estudios demuestran que el potencial inexplorado podría ser de 5.67 PWh-1 (peta-watio hora) por año, atendiendo a restricciones ecológicas y medioambientales (Tefera & Kasiviswanathan, 2022); y que la capacidad no explotada en Sur América sería de un 25% del total, que además puede ser producida a muy bajo costo, menos de US \$0.10 KWh-1 (Gernaat, Bogaart, Vuuren, Biemans, & Niessink, 2017). En América Latina el 62% de la energía es producida por la explotación del recurso hídrico (Balanta & Jina, 2018). Incrementar la cantidad de energía limpia generada, de bajo costo, es un reto para cumplir con uno de los objetivos del plan de desarrollo sostenible para el año 2030: “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para transformar la vida y la economía del planeta.” (Buonomano, Barone, & Forzano, 2022) (Murshed, Khan, & Rahman, 2022) (AbouSeada & Hatem, 2022).

Muchos países en vía de desarrollo tienen una posición geográfica privilegiada que define condiciones climáticas y recursos naturales susceptibles de ser explotados en la producción de energía (Kiplagat, Wang, & Li, 2011). Es así como cobra de nuevo importancia la generación hidroeléctrica con un enfoque ambiental de los proyectos que no frene su desarrollo. La posición

geográfica de Colombia asegura la disponibilidad del recurso hídrico (Jiménez-Segura et al., 2014). Conocido este potencial y la creciente preocupación por la salud del planeta, una estrategia para la explotación del recurso hidráulico es la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas, PCH (Giotitsas, Pazaitis, & Kostakis, 2015) (Fearnside, 2016) (Jager et al., 2022) (Kong et al., 2015) (Shan, Sasthav, Wang, & Lima, 2020) (Arai et al., 2022). Mejorar las condiciones de vida de la población mundial es un deber de quienes tienen el conocimiento técnico y las capacidades de gestión y ejecución. La generación de energía eléctrica limpia, con bajos costos ambientales y técnicos en su producción, es un reto para la sociedad actual y se convierte, además, en una posibilidad de negocio llamativo para inversionistas en el mundo (Paish, 2002) (Carvajal Escobar, 2016). Desarrollos hidroeléctricos pequeños, que generen un bajo impacto ambiental y que redunden en bienestar de una comunidad son interesantes para un país (Sanz, Investigador, Hidráulica, & De, 2013).

Disponer de energía eléctrica para un sin número de actividades, con los consiguientes ingresos que promuevan la implementación de otros proyectos, (Bhattarai, Maraseni, & Apan, 2022)(Kałuza et al., 2022) (Harlan & Hennig, 2022) es un conjunto de beneficios que se logrará a través de definir una metodología aplicable a las condiciones de nuestro territorio, que generen el mayor provecho y factor de planta, pero que a su vez, garantice la sostenibilidad considerando la variabilidad climática; permitirá además, que otros proyectos como el de PCH de El Cofre en el Municipio de Totoró, se planifiquen desde la óptica de la Gestión Integral del Recurso Hídrico. (Aguirre,2024.). Encontrar un “equilibrio” entre el aspecto ambiental y el económico es necesario para lograr desarrollo con sostenibilidad (Arai et al., 2022).

Este trabajo enmarcado en las líneas de investigación del grupo en Hidráulica e Hidrología que sustenta al programa de Maestría en Ingeniería Hidráulica e Hidrológica de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) procura un avance en el conocimiento y en la formación de profesionales con capacidades para pensar diferente y desarrollar investigación que provoque un impacto significativo para lograr un progreso tangible: el desarrollo sostenible de la región. Tiene un valor académico significativo para la FIC cuyo objetivo a corto plazo es el de posicionarse, en el ámbito nacional e internacional, como referente en investigación e innovación en diversas áreas del conocimiento propias de su quehacer. Mejora además las condiciones ofrecidas a los estudiantes de pregrado que podrán beneficiarse de los conocimientos sobre el tema desarrollado y de los métodos para lograrlo, así que también contribuye con su formación.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Desarrollar una metodología para determinar el caudal aprovechable en proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas bajo escenarios de variabilidad climática: caso de estudio corriente El Cofre, municipio de Totoró (Cauca, Colombia).

4.2 Específicos

Identificar las metodologías usadas en el ámbito mundial para la determinación de caudales de aprovechamiento para proyectos de pequeñas y micro centrales hidroeléctricas, en condiciones similares a las del contexto del caso de estudio.

Construir la metodología para determinar el caudal aprovechable en proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas bajo escenarios de variabilidad climática, con base en información de caudales medios mensuales de 60 años (1961 – 2020) registrados en la estación Totoró, ubicada sobre la corriente El Cofre, en el departamento del Cauca.

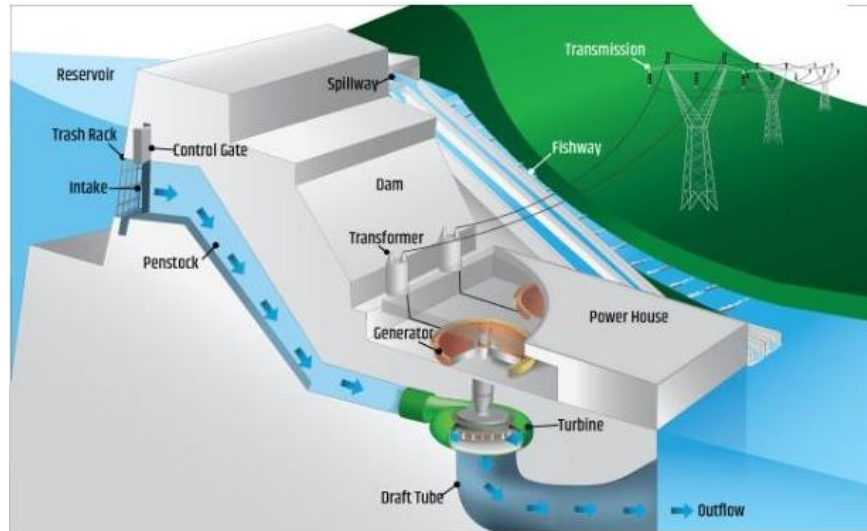
Validar la metodología para la determinación del caudal aprovechable en la PCH caso de estudio, bajo diferentes escenarios de variabilidad climática, en otras plantas de generación con similares características.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Tipos de centrales hidroeléctricas.

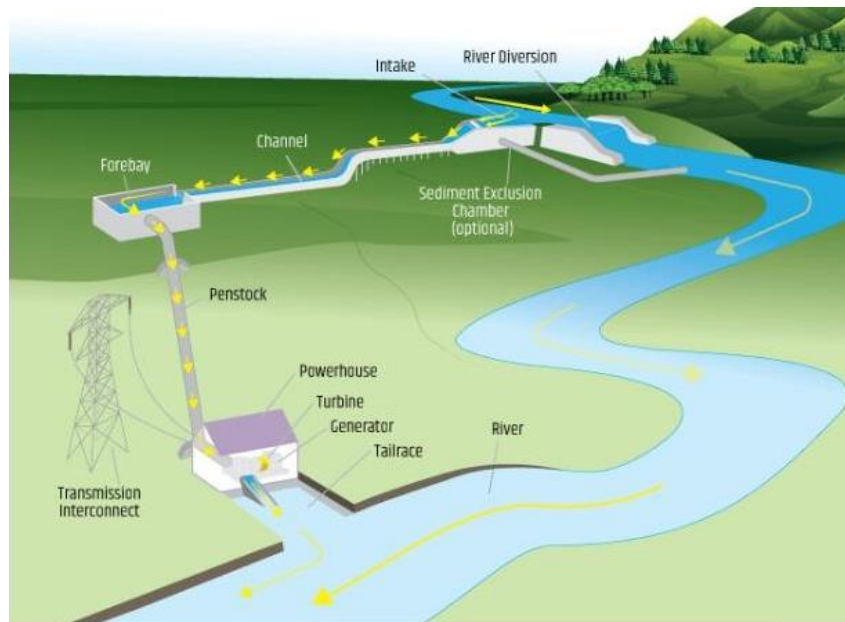
Una central hidroeléctrica es una obra de ingeniería en la que se usa la energía potencial del agua para ser transformada en energía eléctrica. Entre los tipos más comunes de centrales están las de embalse y las de derivación o de agua fluyente típicas de las pequeñas centrales hidroeléctricas PCHs (Sachdev, Akella, & Kumar, 2015) (Quaranta, Bódis, Kasiulis, McNabola, & Pistocchi, 2022). Una central con embalse es aquella que implica la construcción de grandes presas que permiten almacenar volúmenes considerables de agua con el objetivo de incrementar la energía potencial del fluido de modo que se favorezca la potencia del sistema de generación. En este tipo de desarrollos se modifica la velocidad de flujo por el cambio en la profundidad de este, con consecuencias como la sedimentación, la inundación de zonas aguas arriba de la presa, la interrupción de los caminos vitales para especies acuáticas, el caudal aguas abajo, entre otras. Mientras que los desarrollos llamados run-of-river, consisten de pequeñas estructuras de captación, que no implican reservorios que disminuyen la velocidad de flujo, pero que derivan una cantidad de caudal hacia una zona donde se tiene suficiente energía potencial para ser usada en la transformación en energía eléctrica. Ver figuras 1 y 2.

Figura 1. Esquema de central hidroeléctrica con embalse.



Nota: la imagen muestra el esquema clásico de una central hidroeléctrica de embalse con turbinade reacción.
Tomado de: (<https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>, 7/06/2022)

Figura 2. Esquema de central hidroeléctrica con derivación.



Nota: la imagen muestra el esquema clásico de una central hidroeléctrica de derivación, Run-of-River (ROR).
Tomado de (<https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>, 7/06/2022).

Un desarrollo hidroeléctrico se caracteriza, además, por la capacidad instalada en la central de generación que está definida por la potencia de los equipos usados para la transformación de energía. Esta potencia se determina en función del tipo de fluido, del caudal y de la caída o desnivel presentado en el lugar del montaje, lo que

permite hacer una clasificación, no unificada, de las centrales hidroeléctricas así: en Colombia la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, clasifica las centrales según la potencia instalada, mientras que en la Unión Europea (UE) la clasificación se hace con base en la caída y el caudal manejados en la planta (UPME, 2015) (Cassano & Sossan, 2022)(John, Mdee, Kimambo, Nielsen, & Kihedu, 2018) (Escobar Díaz Andrés et al., 2018). La tabla 1 muestra la clasificación de las centrales hidroeléctricas en Colombia y en la Unión Europea.

Tabla 1. Tipo de centrales hidroeléctricas. Clasificación.

Colombia		Unión Europea		
Tipo de central	Capacidad instalada (KW)	Tipo de central	Altura del salto (m)	Caudal (m ³ /s)
Picocentral	0.5 – 5	De alta presión	> 200	< 20
Microcentral	5.0 – 500	De media presión	20 – 200	200
Minicentral	50 – 500	De baja presión	< 20	> 300
Hidroeléctricas (PHC)	500 – 2000			
Centrales hidroeléctricas	> 2000			

Nota: En la tabla anterior se presentan formas de clasificación de las centrales hidroeléctricas por potencia instalada.

5.2 Caudales aprovechables.

En un desarrollo hidroeléctrico el caudal aprovechable se refiere al flujo de agua que puede ser usado en la generación de energía eléctrica y que está comprendido entre el caudal ambiental o de servidumbre y el caudal medio mensual multianual (QMMM) obtenido del registro histórico de caudales en la fuente. Caudales menores que el caudal de servidumbre o ambiental no podrán ser turbinados y caudales mayores que el caudal medio mensual multianual se dejarán pasar. Es así como la determinación del caudal aprovechable está directamente relacionada con las restricciones ambientales en la fuente, estas limitan la producción. En la determinación del caudal mínimo utilizable hay dos tendencias, a saber: aquellas que priorizan consideraciones económicas y de productividad del sistema de generación y las que se centran en garantizar la estabilidad e integridad ambiental del ecosistema acuático que soporta a la hidroeléctrica. Dentro de estas visiones resulta usual tomar, como límite inferior para definir el caudal aprovechable, el que corresponde al percentil 90% en la curva de duración de caudales (CDC) (Meza-Prieto & Aparicio, 2018), que se considera un valor aceptable desde el punto de vista de eficiencia técnica y rentabilidad económica pues procura un factor de planta alto que permite que la estación de generación trabaje, con la potencia máxima instalada, durante un mayor tiempo del año, o el correspondiente al 25% del caudal mediodiario multianual (Młyński, Wałęga, & Kuriqi, 2021a) o, dependiendo de la calidad de la cuenca tributaria

del sistema, el del percentil 75% o el del 85% en la CDC, tendencia contemporánea que pretende preservar la calidad del ecosistema en atención a las presiones sobre el recurso agua (ENA, 2022).

Los caudales mínimos que limitan la magnitud del caudal aprovechable se pueden determinar por diferentes métodos entre los que se encuentran los de tipo hidrológico, hidráulico, los de hábitat y el holístico (Młyński, Wałęga, & Kuriqi, 2021b) (Tan et al., 2018) (Książek et al., 2019). Todos involucran el aspecto de conservación desde diferentes concepciones, pues buscan mantener la integridad del cauce aguas abajo del emplazamiento hidroeléctrico, integridad que se refiere al sostenimiento de la vida acuática, de la ribereña y de los aprovechamientos y explotaciones aguas abajo de la hidroeléctrica.

Los métodos hidrológicos para la determinación de los caudales son sencillos y usados ampliamente cuando se dispone de información histórica (registros hidrológicos periódicos) de los caudales en la fuente, que permiten la construcción y el análisis de la curva de duración, a partir de la cual se logran esos valores límite. Los métodos hidráulicos buscan determinar un caudal ambiental a través de una relación entre los elementos geométricos de la sección transversal del cauce, como el perímetro mojado o la profundidad de flujo y la disponibilidad de alimento para los individuos de diferentes especies (Tharme, 2003). Los métodos de simulación de hábitat, biológicos o ecológicos se basan en el conocimiento de las especies acuáticas propias del cauce, lo que implica la necesidad de hacer aforos de especímenes en la sección a intervenir, durante distintos períodos, para conocer tipo de individuos y cantidad de ellos (Guzmán-Ariaset al., 2019), y el holístico que considera todos los aspectos involucrados en la producción de caudal en una cuenca y las posibles consecuencias de su explotación.

5.3 Caudal de generación

El caudal de generación en una central hidroeléctrica se refiere al volumen de agua que fluye a través de las turbinas para generar electricidad. Este caudal está asociado directamente con el caudal aprovechable, pues será un caudal en el rango aprovechable o sea mayor que el ambiental o de servidumbre y menor o igual al QMMM, el que podrá ser usado en la transformación de energía. Caudales más bajos que el mínimo no podrán ser beneficiados en la estación, y caudales superiores al medio mensual multianual se dejarán pasar, así que el caudal para generación será uno en el rango de caudal aprovechable que es determinado por consideraciones ambientales y de conservación ecológica, y el caudal medio mensual multianual (Hernández & Carvajal-Serna, 2017). La regla de operación de la planta hidroeléctrica se define entonces por el caudal aportado por la fuente y susceptible de ser usado, y por la demanda de la población, que es monitoreada en tiempo real, (Paola Bianucci & Garrote de Marcos, 2013) entre otras consideraciones. Dependiendo de la potencia instalada en la central de generación y del caudal tomado para ser turbinado, será la cantidad de energía producida por la central.

5.4 Caudales y variabilidad climática.

La dinámica atmosférica y su interacción con los océanos y con la litosfera produce diferentes corrientes que condicionan el clima en las regiones del planeta. Estas corrientes junto con las características geográficas y topográficas, propias de cada zona, determinan el clima en cada una (Norberto Velasco Sánchez, n.d.). La interacción de las corrientes mencionadas con la topografía y ubicación de los diferentes lugares produce la variabilidad climática, entendida esta como los cambios naturales en las condiciones del tiempo atmosférico registrados en períodos de días, meses

o años, sin que se configuren modificaciones del clima de la región, pues son variaciones “naturales” respecto de la normal climatológica, o sea aquella determinada por el valor medio de al menos 30 años de registro de las variables atmosféricas que, según la OMM, debe ser determinada en el período 1961- 1991 (Meteorológica Mundial, 2018). Estos cambios son denominados anomalías que pueden ser producidas por modificaciones en los patrones normales de las corrientes globales que son: La oscilación del Atlántico Norte, NAO por sus siglas en inglés; La Oscilación Multi decadal del Atlántico (AMO); El patrón Norte América Pacífico (PNA); Oscilación decadal del Pacífico (PDO); El Niño Oscilación del Sur (ENSO); Modo Anular del Norte (NAM); Modo Anular del Sur (SAM) (de Viron et al., 2013; Meteorológica Mundial, 2018).

Los caudales de diseño y de generación en una central hidroeléctrica son determinados por el régimen de lluvias de la cuenca tributaria del cauce explotado que naturalmente varía a lo largo del año, encontrándose regiones en el mundo con régimen bimodal de lluvias, mientras que otras tienen una frecuencia unimodal. Esto indica que los caudales en la fuente variarán naturalmente alrededor de un valor medio anual multianual. En los últimos años se ha documentado en el planeta el efecto de las actividades del ser humano sobre las variables climáticas, que incluso ha llegado a determinar una nueva era, el Antropoceno (Arias, 2020) (Trischler & Trischler, 2017). Se han notado alteraciones en los valores medios históricos de las variables climáticas como la temperatura con consecuencias sobre el régimen de lluvias (Dyer et al., 2014) y se han reportado fenómenos extremos con mayor periodicidad. En estos fenómenos, llamados anomalías, se han registrado valores superiores e inferiores a los extremos históricos, indicando que pueden presentarse caudales mayores que los reportados o menores que los mínimos registrados (Ramírez-Cerpa, Acosta-Coll, & Vélez-Zapata, 2017).

La variabilidad climática ocurrida naturalmente modifica la regla de operación mensual en una hidroeléctrica cuando se ha definido un caudal de diseño para generación basado en el análisis de los registros históricos, pero esa variabilidad natural, afectada por las anomalías, no solo modifica la regla de operación establecida, sino que, además, afecta la determinación de los caudales de diseño para futuros desarrollos. Estudios en Colombia han reportado que las variaciones de caudal en períodos de anomalías negativas (enfriamiento de la superficie del océano Pacífico) en las principales corrientes han significado incrementos de hasta el 70% del caudal base conocido, mientras que durante períodos de anomalías positivas (calentamiento de la superficie del océano) la reducción de los caudales ha sido de entre el 26% y el 40% dependiendo de la zona del país (García, Piñeros Botero, Bernal Quiroga, & Ardila Robles, 2012 Knapp et al., 2015). Los cambios producidos con el paso del tiempo generarán una reducción del potencial hidroeléctrico según predicciones hechas (de Jong et al., 2021) (Guo et al., 2021) o provocarán un incremento, dependiendo del lugar donde se encuentre el desarrollo.

Proyecciones de los efectos de la variabilidad climática sobre los caudales de fuentes potencialmente aptas para la explotación hidroeléctrica son necesarias para definir el futuro del desarrollo de esta actividad. En la historia se han considerado métodos estadísticos para proyección de precipitaciones y caudales, pero en este momento histórico las proyecciones hechas bajo estadísticos pueden no representar de forma idónea un posible escenario futuro, pues basa su análisis en la determinación de una tendencia que no depende del tiempo, mientras que los análisis de series de tiempo, análisis dinámicos, pueden llevar a entender de una mejor manera los posibles valores futuros de ciertas variables determinantes para la viabilidad de un proyecto. Que los datos históricos de precipitación o caudal se hayan presentado de una forma, con cierto grado de estacionalidad o tendencia, no significa necesariamente que en el futuro vaya a suceder igual. Los métodos estadísticos clásicos no consideran el carácter estocástico de los parámetros estudiados, que si puede verse representado en un modelo dinámico de proyección como el ARIMA (Ayuga et al., n.d.). El grupo intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático, como resultado de sus evaluaciones, ha planteado una serie de escenarios de emisión de gases efecto invernadero bajo condiciones extremas de emisión y otras controladas, que definirán los incrementos de temperatura en la atmósfera terrestre y por tanto el comportamiento de variables climáticas como la precipitación. La variabilidad climática histórica hasta el momento se puede ver afectada bajo estas condiciones, por lo que

diferentes países en el mundo están haciendo la evaluación de los posibles cambios y alteraciones a los regímenes observados, con el objetivo de planificar el desarrollo futuro. Se tienen modelos a escala reducida de los modelos globales de circulación atmosférica para determinar la afectación en la temperatura de cada lugar, para definir las posibles condiciones futuras de producción de energía y de necesidades de esta.

Se han analizado series de tiempo y se estudia la posibilidad de usar series cortas, del orden de 20 años, para representar el clima en el futuro, lo que parece tener más solidez y consistencia en función de los cambios presentados en lo que va corrido del siglo XXI (Gil et al., 2021). En Colombia el estudio Nacional del Agua (ENA, 2022), presenta resultados de escenarios teóricos de variabilidad definidos como años húmedos y secos, para los cuales la oferta hídrica superficial se vería incrementada en un 122% y reducida en un 58% respectivamente; mientras que del análisis de la variabilidad con base en la información histórica resulta que, en general, la reducción en la producción en las cinco áreas hidrográficas está entre el 16% y el 21% y el incremento oscila entre el 21% y el 50%, lo que significa que la Oferta Hídrica Disponible (OHD) en el territorio podría estar entre el 50% y el 70% de la oferta hídrica total superficial en el país, entendida la OHD como aquella que puede ser usada para actividades antrópicas sin detrimento de los condiciones ambientales aguas abajo del punto de uso en la cuenca.

5.5 Métodos para determinar la variabilidad climática.

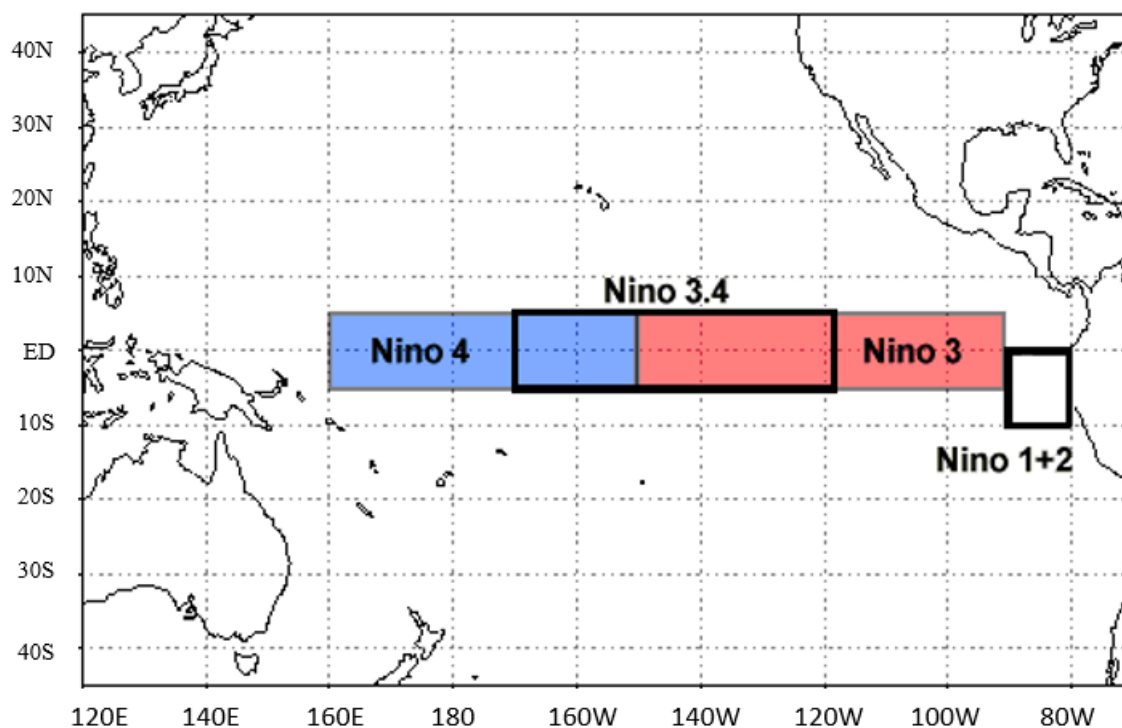
El comportamiento diferente de las corrientes atmosféricas, relativamente periódico, induce modificaciones sobre parámetros como la temperatura de los océanos y la presión atmosférica, entre otros, que pueden ser medidos y controlados en espacio y tiempo de modo que los registros obtenidos permitan detectar períodos en los que existe o no variación significativa de estos. Definir la influencia de la variabilidad climática interna sobre las variables hidrológicas implica determinar los años húmedos y los años secos históricos, con base en los cuales podrían hacerse proyecciones de los posibles escenarios futuros de variación, entre otros análisis. Existen en la literatura algunos métodos reportados para evaluar la variabilidad y la detectar la presencia de fenómenos extremos, que pueden ser definidos como anomalías en tanto crucen un cierto umbral considerado normal. En la tabla 2 se nombran los índices, las variables sobre las que se soportan y algunas referencias de uso para Colombia que demuestran su eficacia en la determinación de los períodos húmedos o secos o aquellos correspondientes a períodos La Niña o El Niño, respectivamente. (de Viron et al., 2013)

Tabla 2. *Índices para determinar variabilidad climática.*

Índice	Características	VARIABLES consideradas	Referencias
ÍNDICES OCEÁNICOS			
Temperatura superficial del mar	Asociados a las anomalías de temperatura que se presentan en la superficie del océano Pacífico. Determina las anomalías de la temperatura superficial del océano Pacífico en las 4 zonas ubicadas sobre la línea ecuatorial. Se calculan las anomalías con respecto a la normal climatológica	Temperatura superficial del mar	* Estudios del IDEAM en Colombia para la actualización del Atlas Climatológico. * Estudio de CENICAFÉ para determinar afectación del cultivo bajo fenómenos ENOS. * Loaiza Ceró et al demuestran en su estudio para la ciudad de Cali que existe mayor concordancia entre SST y el fenómeno ENSO para esta zona. * Salas, Poveda Mesa et al, demuestran fuerte relación entre el SST y la lluvia en Colombia en la región Andina. * Vanoldenborgh et al. * Zambrano, Mera, Rivadeneira muestran SST gran influencia en la PPT en zona tropical.
ONI. Es el índice principal de la NOAA que permite rastrear el fenómeno El Niño en el océano Pacífico	Se determina por medio de la media móvil de las anomalías de temperatura de tres meses consecutivos en la superficie del agua, en la zona centro oeste del pacífico tropical. Valores del índice +0.5 o superiores, indican presencia del fenómeno de El Niño valores de -0.5 o menores indican enfriamiento de la superficie del agua y por	Temperatura superficial del océano	* Para la cuenca del río Cali, Pérez-Ortiz et al, demostraron que no representa a cabalidad el comportamiento de las lluvias por correspondencia con el fenómeno ENSO. * Peña y Bermudez establecen que el índice ONI es aceptable para considerar precauciones climáticas en el cultivo de café en Colombia.
Anomalías de la temperatura superficial del mar hasta 400 m de profundidad			
Comportamiento de la Termoclina del Pacífico			
Contenido de calor de la capa superficial del océano.			
ÍNDICES ATMOSFÉRICOS			
Índice de la Oscilación del Sur IOS. Es un índice estándar definido por las diferencias de presión al nivel del mar, observadas entre Tahiti y Darwin en Australia. Es la medida de las fluctuaciones de la presión durante los fenómenos de La Niña y El Niño.	La fase negativa del IOS (SOI) representa una presión de aire por debajo de lo normal en Tahiti y una presión por encima de lo normal en Darwin. Los períodos negativos coinciden con aguas cálidas en el océano, fenómeno de El Niño y valores positivos del SOI corresponden con períodos anormalmente fríos en la superficie del océano, correspondientes al fenómeno de La Niña.	Presión atmosférica sobre la superficie del océano Pacífico.	
Vientos			
Temperatura del aire			
Radiación solar de onda larga			
ÍNDICES MIXTOS			
Índice multivariado ENSO MEI	Consideran el efecto combinado de algunas variables climáticas. Cambian variables atmosféricas y oceánicas en un solo índice que facilita la evaluación del fenómeno ENSO (el Niño Oscilación del Sur). Proporciona información en tiempo real sobre la intensidad del fenómeno ENSO. Es un modelo multivariado bimensual. valores positivos del MEI indican fenómeno de El Niño, valores negativos de MEI coinciden con enfriamiento de la superficie del	Presión en la superficie marina, temperatura de la superficie del agua en el océano, componentes del viento en superficie y radiación solar de onda larga en el Pacífico Tropical.	Quevedo Tejada Cetaqua & Peredo- Parada, 2015
Índice de precipitación Etándar (SPI). Pretende determinar el estado de sequía de algún lugar	Se calcula a partir de la relación entre la diferencia en precipitación respecto de la media del período y la desviación estándar.	Precipitación	

Tal como se refleja en la tabla anterior existen varios métodos con los cuales pueden conocerse los períodos de anomalías. De los más usados son los índices ONI y SPI. En Colombia, en el documento IDEAM, “Actualización del Componente Meteorológico del Modelo Institucional del IDEAM Sobre el Efecto Climático de los Fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como Insumo para el Atlas Climatológico” Montealegre hace la clasificación de los períodos La Niña y El Niño con base en la aplicación del método aSST N3. Para determinar los índices ONI y aSST N3 se usa la información de temperatura superficial del Océano Pacífico, registrada en la región ecuatorial, en diferentes zonas identificadas como 1+2, 3, 3.4 y 4. El índice ONI se determina específicamente por la temperatura registrada en la zona 3.4 que es aquella que presenta mayor variabilidad (Abril-Salcedo et al., 2016), mientras que el índice aSST N3 determina las anomalías a partir de la variación de temperatura en la zona 3 del Océano Pacífico (José Edgar Montealegre Bocanegra, 2014). La figura 3 muestra la ubicación espacial de las áreas monitoreadas por medio de satélite para detectar los cambios en la temperatura superficial del océano que podrían definir la aparición o no de anomalías.

Figura 3. Zonificación del Pacífico Ecuatorial para Determinación del fenómeno ENOS



Tomado de: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst>

La clasificación de los períodos La Niña y El Niño con base en la aplicación del método aSST N3 implica tener en cuenta, como condición normal de temperatura, aquella comprendida entre +1 y -1 la desviación estándar de la temperatura media multianual superficial del océano en la zona 3, por lo tanto, serán meses húmedos aquellos con valores de anomalías inferiores a -1 desviación estándar y serán meses secos aquellos en los que la temperatura superficial del océano sea superior a la temperatura media multianual del mes, más una desviación estándar. Mientras que las anomalías se definen a partir de la temperatura superficial del Océano Pacífico en la zona 3.4 para el índice ONI. Se considera la anomalía siempre que la temperatura de la superficie del océano varíe en $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ por

al menos cinco meses consecutivos. Así los períodos considerados normales o neutros son aquellos en que las variaciones promedio de la temperatura superficial de océano no fueron superiores o inferiores a 0.5 grados centígrados por al menos cinco meses consecutivos. Los períodos con anomalías negativas significan un enfriamiento de la superficie del océano presentando entonces las condiciones propias del fenómeno La Niña, mientras que los períodos de anomalías positivas indican un calentamiento de la superficie del océano consecuente con períodos secos El Niño (Peña-Q et al., 2015).

El índice de precipitación estándar SPI por sus siglas en inglés, está definido para determinar períodos de sequía y su intensidad. A diferencia de los anteriores índices este tiene en cuenta los registros de lluvias propias de la zona a estudiar y puede determinarse para distintos períodos o lapsos a partir de la normalización de la variable y por extrapolación de resultados no solo pueden definirse los períodos secos, sino también aquellos considerados normales y húmedos. La clasificación en distintos grados de intensidad está determinada a partir de los valores de SPI obtenidos, así: se consideran períodos normales aquellos con índices entre -1 y 1; valores mayores que 1 representan períodos considerados húmedos, y valores de SPI menores que 1 representan períodos secos (Moreira; Achite et al., 2022). La organización meteorológica mundial ha publicado un manual donde aplica la metodología propuesta por McKee y otros en 1993 y ha planteado la clasificación mostrada en la tabla 3.

Tabla 3. *Valores del índice normalizado de precipitación y clasificación del período*

Valor del índice SPI	Clasificación
2.0 o mas	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Tomado de la guía de Usuario, Índice Normalizado de Precipitación, OMM(OMM, 2012)

5.6 Experiencias en la determinación de caudales para generación.

La evidencia del cambio climático global ha promovido la necesidad de estudiar sus efectos sobre diferentes aspectos entre los que está la generación hidroeléctrica. Siendo que se considera energía limpia, con baja emisión de gases efecto invernadero y un gran potencial hídrico inexplorado en el mundo, la afectación del cambio climático y las anomalías presentadas han hecho que los diferentes países se interesen en conocer los efectos de esto sobre la generación de energía de bajo costo económico y ambiental, pues es un objetivo de desarrollo sostenible y además implica seguridad para cada nación. China y algunos países de Sur América han desarrollado

investigaciones para determinar el grado de afectación en la producción de energía por el cambio climático, aplicando métodos como el de las redes neuronales artificiales. Resultado de esas evaluaciones se han hecho algunas predicciones que indicarían que, en los próximos años, la energía hidráulica en China no alcanzará a suplir la demanda de la población y tendría que producirse con otros primarios, como los combustibles fósiles que aumentan la producción de gases efecto invernadero (Guo et al., 2021) (de Jong et al., 2021). En Mozambique han aplicado métodos para determinar la afectación en la hidro-generación producto del cambio climático y han encontrado que se aumentará la variabilidad en el régimen de lluvias y que se incrementarán los períodos de sequía, lo que causará una reducción en el potencial de generación haciendo a este país uno de los más vulnerables frente al cambio climático (Uamusse et al., 2017). En la cuenca del río San Francisco en Brasil se aplicaron métodos hidrológicos bajo 52 escenarios posibles de cambio y se analizaron las variables temperatura y precipitación, y su consecuencia sobre la generación, encontrando que valores extremos positivos no alterarían el funcionamiento de la hidroeléctrica, mientras que la reducción en la precipitación causaría una alerta de funcionamiento para el sistema (Hidalgo et al., 2020) y en Chile se ha hecho una valoración sobre el potencial hidroeléctrico bajo escenarios de cambio climático en 4 cuencas, entre las que está la del río Maipo, sugiriendo el incremento del potencial hidroeléctrico en el país durante los próximos 30 años (Jesús Arriagada Sanhueza Guía & Link Lazo, 2019).

5.7 Series de tiempo. Modelos ARIMA.

Una serie de tiempo es un registro de una variable que toma diferentes valores en un periodo establecido; es un registro continuo con una determinada periodicidad (Fang et al., 2023; Introducción a Series de Tiempo Por: John Villavicencio; Petelin et al., 2023). Para los estudios hidro-climatológicos, las series de tiempo de procesos naturales como la lluvia, la temperatura, los caudales de un río suelen estar registrados en períodos horarios, diarios, mensuales y anuales, generalmente, lo que determina una serie discreta. Si bien la variable es de tipo continuo, existen algunos registros logrados cada segundo, como en el caso de la variable caudal tomada con un limnígrafo y series de lluvias obtenidas a partir de un pluviógrafo.

Estas variables, asociadas al tiempo, pueden ser representadas a través de un modelo estadístico que se obtiene a partir de los datos históricos registrados (valores en el tiempo) y que pretende predecir (valores pasados) y sirve además para pronosticar valores futuros con base en la propia información, encontrando una autocorrelación, asociación lineal, entre las observaciones separadas un cierto número de períodos. Estos modelos buscan definir el valor de una variable en un momento con base en su historia reciente.

En términos generales, el modelo ARIMA es un proceso estocástico que genera una serie de tiempo, el cual ex ante no se conoce. El proceso estocástico da origen a los datos observados (realización) y estos se pueden describir a través de una ecuación (modelo) después de un análisis estadístico. Cada una de las variables que configuran un proceso estocástico, tendrá su propia función de distribución con sus correspondientes momentos. Así mismo, cada par de esas variables tendrá su correspondiente función de distribución conjunta y sus funciones de distribución marginales.

Un modelo ARIMA se constituye de unos parámetros que determinan el orden de cada una de las partes del modelo. El término AR, o parte autorregresiva, muestra cómo la historia pasada de la misma serie de tiempo analizada, explica su valor actual. El rezago máximo se denota por la letra p . La parte correspondiente a la media móvil MA, muestra cómo, choques exógenos aleatorios pasados, explican el valor actual de la serie de tiempo. El rezago máximo se denota por la letra q . Finalmente, el término I del modelo hace referencia al orden de integración de la serie de tiempo, es decir, muestra el número de veces que la serie debe diferenciarse para que su media, varianza y covarianza sea constante a través del tiempo, o lo que es lo mismo, para que la serie sea estacionaria. El orden de integración se denota por la letra d . ((Lu, 2021; Pilar et al., n.d.; Shakti et al., 2017; Y. Zhang et al., 2022).

Vale indicar que los modelos ARIMA solo pueden aplicarse para series que son estacionarias. Algunas series de tiempo lo son por definición y por tanto el orden de integración es nulo o I (0); pero otras series no lo son. Sin embargo, la estacionariedad se logra como máximo con una o dos diferenciaciones, I (1) o I (2). Así las cosas, todas las series de tiempo son susceptibles de aplicarse un modelo ARIMA para predecir sus valores futuros.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el análisis de las series de tiempo consiste en encontrar el orden correcto (p, d, q) de cada una de las partes del modelo, además de estimar los parámetros del mismo que faciliten la obtención de una expresión estocástica para simular los valores históricos y hacer la predicción de valores futuros. La forma estocástica de un modelo ARIMA (p,d,q) es la siguiente:

$$Y_t = c + \varphi_1 Y_{t-1} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + a_t + \theta_1 a_{t-1} + \dots + \theta_q a_{t-q} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Lo anterior indica que el valor de la serie de tiempo Y_t (la cual debe ser estacionaria por definición o por diferenciación) depende de su propio pasado hasta el momento t-p, igualmente depende de choques aleatorios (conocidas también como innovaciones) hasta el momento t-q. La letra c es un intercepto o conocido también en esta jerga como deriva. Esta se incluye cuando la serie de tiempo analizada tiene una tendencia creciente o decreciente a través del tiempo.

La variable ε_t es una variable aleatoria que explica las variaciones de Y_t que no son explicadas por la parte AR(p) ni por la MA(q). Es decir, es una componente puramente aleatoria del proceso, que no depende ni de la historia ni de las innovaciones (Pilar et al., n.d.; Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador, n.d.). Esta variable se supone sigue una distribución normal con media cero y varianza constante e igual a 1, es decir se supone que es una variable aleatoria ruido blanco.

Una variante del modelo ARIMA, es aquel que incluye variables explicativas determinísticas (X), las cuales no guardan relación con AR(p), ni con MA(q), ni con ε_t ; es decir, incluye variables netamente exógenas. Estas últimas pueden considerarse predictores de los valores de la serie, permitiendo a través de su inclusión en el modelo, obtener mejores valores de predicción provocando, por ende, menores errores con los valores observados. Estos modelos se conocen como modelos ARIMAX (p, d, q). Cuando las observaciones presentan periodicidad, puede determinarse un modelo denominado SARIMA o SARIMAX en el que se está representando el carácter estacional de la serie, o sea la periodicidad con la que se presentan rezagos estadísticamente significativos en el modelo (Beyaztas et al., 2021).

Las herramientas principales en la identificación del orden p y q de un modelo ARIMA son la Función de Autocorrelación (FAC), la Función de Autocorrelación Parcial (FACP) y sus gráficos llamados correlogramas. Estas son medidas de asociación entre valores pasados y actuales de la serie, que sirven para determinar cuáles son los valores pasados más útiles para predecir los futuros.

La función de autocorrelación simple es útil en la determinación del orden q del modelo y detecta los errores pasados de la serie que son más útiles para predecir los valores futuros (componente MA); mientras que la función de autocorrelación parcial determina el orden del modelo en la parte autorregresiva, encontrando el valor rezagado de la serie más útil para definir el futuro. Un modelo ARIMA define los valores de la serie a partir de su historia reciente, por lo que se busca un modelo sencillo de buen ajuste, en el que no se pierda mucha información.

La Función de autocorrelación (FAC) para un rezago k es la medida de la correlación entre las observaciones de una serie separadas k unidades de tiempo, mientras que la Función de

Autocorrelación Parcial (FACP) tiene en cuenta los valores de autocorrelación en los intervalos intermedios entre t y k.

Matemáticamente la FAC se determina así:

$$FAC = \frac{\sum(Y_t - \bar{Y})(Y_{t+k} - \bar{Y})}{\sum(Y_t - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

Donde:

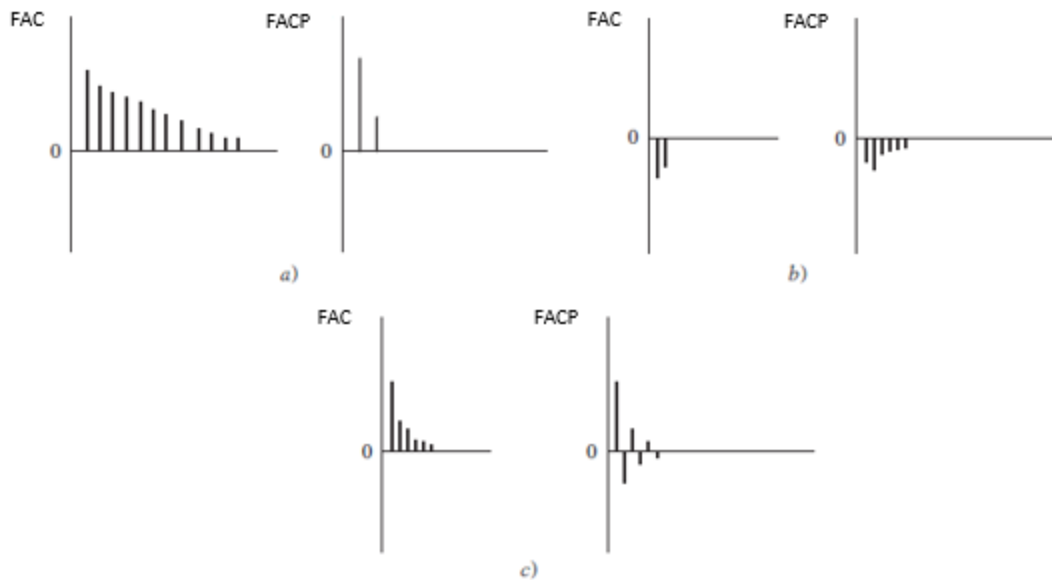
Y_t corresponde a una observación en el tiempo t

k representa el rezago

\bar{Y} el valor medio de la serie.

De los resultados gráficos (correlogramas) de la FAC y FACP pueden determinarse los rezagos estadísticamente significativos (diferentes de cero) que permitan definir el orden del modelo. En la figura 4 se muestran gráficos típicos (teóricos) de FAC y FACP para modelos ARIMA, que no se presentarán tal y como en problemas reales, pero que si sirven de guía al momento de determinar el orden del modelo. Puede haber varios modelos posibles dependiendo de los resultados de los correlogramas, modelos que deberán ser analizados con base en estadísticos como el coeficiente R^2 de ajuste global del modelo y el criterio de información de Akaike para escoger el mejor, que será aquel que presente mayor R^2 y menor valor de Akaike para identificar el que pierde menos información; el valor de significancia de cada uno de los parámetros ϕ y θ estimados a partir de un proceso de regresión para los rezagos significativos del modelo, así como los correlogramas de los residuos cuyos valores deben ser nulos, serán otros indicativos de que el modelo ARIMA ajusta satisfactoriamente a la serie de origen.

Figura 4. *Patrones teóricos de FAC y FACP*



Tomado de Gujarat (Econometría, 2010) página 781.

Nota: Los gráficos a) muestran que la FAC decrece exponencialmente, mientras que el gráfico FACP decrece bruscamente y hay dos líneas estadísticamente significativas, de modo que corresponde a un modelo AR (2)

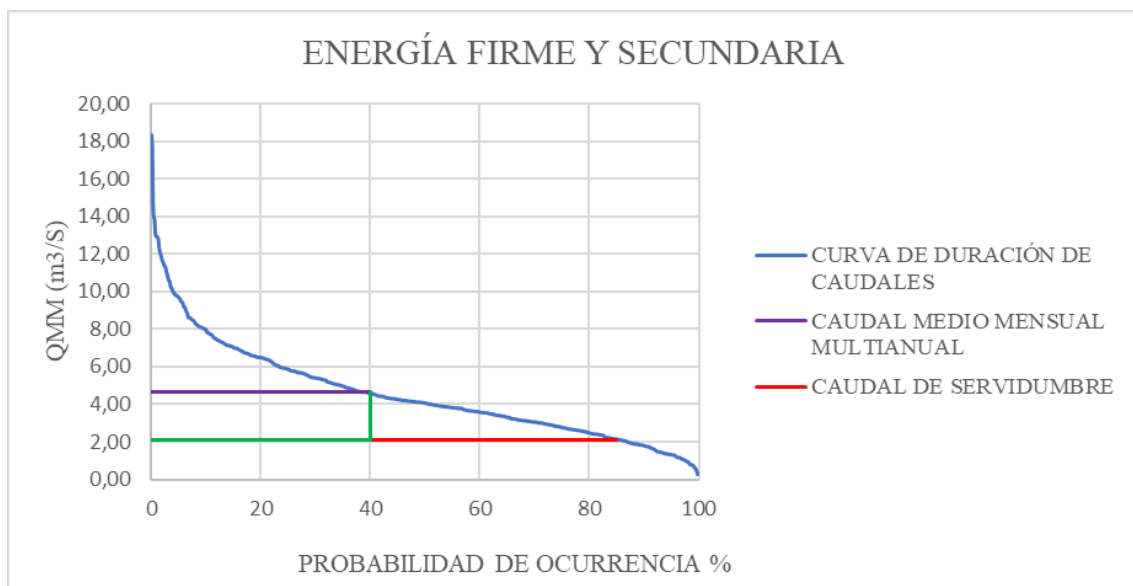
determinado por la FACP, tal como se mencionó anteriormente. En el gráfico b) se observa un comportamiento contrario, mientras que la FACP decrece gradualmente la FAC lo hace bruscamente y aparecen dos rezagos estadísticamente significativos, por lo que el gráfico corresponde a un modelo MA (2). En el gráfico c) el decrecimiento es brusco y se observa un rezago significativo para ambas funciones, de modo que se representa un modelo ARMA (1,1).

Definido el modelo ARIMA que mejor ajusta a la serie de origen y a partir de su ecuación será posible hacer el pronóstico, y en caso de haberse necesitado la diferenciación de la serie será necesario integrarla para obtener los valores de la serie en lugar del cambio en los valores de la variable en el intervalo considerado.

5.8 Energía Total producida y Factor de Planta.

El desarrollo de una central de generación hidroeléctrica implica un sin número de pasos entre los cuales se encuentra el estudio de prefactibilidad en el que se debe considerar el lugar de emplazamiento de la posible central. Lugar que estará determinado por la presencia de una fuente abastecedora de caudal y una caída o diferencia de nivel que propicie las condiciones para lograr una alta eficiencia en la transformación energética. Este estudio requiere un cálculo preliminar de la energía total que produciría la estación y la determinación de lo que se conoce como factor de planta de la central, que indica el tiempo del año en que la central estaría trabajando a plena potencia, o sea usando el total de la capacidad instalada. El uso de la capacidad instalada está asociado a la generación de energía, que depende del caudal que pueda ser usado, así: energía firme y energía secundaria. La energía firme corresponde a aquella generada para la potencia instalada (potencia hidráulica) o sea que es la energía producida cuando el caudal que entra a la central es el caudal aprovechable y la energía secundaria es aquella que se produce cuando en la fuente se presentan caudales menores al medio multianual, pero mayores a aquel considerado de servidumbre. Caudales mayores al caudal medio histórico se dejarán pasar y no producirán energía (Ardizzon et al., 2014; Hosseini et al., 2008). En la figura 5 se muestran cada una de las formas de energía generadas en una central hidroeléctrica a partir de la curva de duración de caudales en la fuente. Así, la energía firme corresponde al área rectangular limitada por los caudales de servidumbre y caudal medio mensual multianual y la energía secundaria al área bajo la curva de duración de caudales limitada en su parte inferior por el caudal de servidumbre (Osorno-Cardona et al., 2018).

Figura 5. Representación gráfica de la energía firme y la energía secundaria.



$$\text{Energía} = \text{potencia} \times \text{tiempo} \quad (3)$$

$$\text{Energía Firme} = \gamma(Q_{MMM} - Q_e)HxT \quad (4)$$

donde: γ es el peso específico del agua
 Q_{MMM} es el caudal medio mensual multianual de la fuente
 Q_e es el caudal ambiental, ecológico o de servidumbre
 H es la altura del salto en la ubicación de la PCH
 T es el tiempo de permanencia del caudal

$$\text{Energía Secundaria} = \text{Energía Firme para } Q_i - \text{Energía Firme para } Q_e \quad (5)$$

5.9 Potencia

La potencia es una magnitud física que representa la energía por unidad de tiempo. Para un desarrollo hidroeléctrico se determina la potencia hidráulica correspondiente a las características propias del proyecto como son el caudal, la energía disponible para ser transformada o energía potencial del salto y el peso específico del fluido. Para un desarrollo como estos se calculan además los valores de energía eléctrica producida y factor de planta, de los que resulta la potencia para máximo rendimiento de la central que está determinada por la máxima cantidad de energía producida en un tiempo, para el máximo factor de planta posible bajo las condiciones de caudal aprovechable del sistema.

5.10 Normas y leyes aplicables sobre aprovechamiento hidroeléctrico en Colombia.

El Ministerio de Minas y Energía en su página web www.minenergia.gov.co tiene publicada la información que se presenta a continuación:

- Código de los Recursos Naturales Renovables de 1974
- Ley 99 de 1993. Crea el Ministerio de Ambiente, organiza el Sistema Nacional Ambiental y define el ordenamiento ambiental territorial
- Ley 142 de 1994. Servicios públicos domiciliarios. (Montoya-Domínguez & Rojas-Robles, 2019)
- Ley 143 del 11 de julio de 1994. Por la cual se establece el régimen de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional.
- Decreto 3930 de 2010. Modificación parcial de la Ley 9 de 1979, decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
- Ley 1715 de 2014. Ley de energías renovables.
- Resolución UPME 0281 de 2015, "Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala".
- Resolución CREG 024 de 2015, "Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)".
- Estudio Nacional del Agua, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MDAS), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), (ENA -2022).
- Resoluciones 751 y 958 de 2018 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico continental superficial.
- Resolución 2130 de 2019, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Adopción de la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

El alcance de la investigación es explicativo, pues pretende establecer la relación entre la variabilidad climática y los caudales en la cuenca del río El Cofre y definir sus consecuencias sobre el valor de caudal aprovechable para establecer la potencia instalada en la PCH proyectada o su capacidad de generación.

Hipótesis de investigación. La variabilidad climática afecta los valores de caudal aprovechable, para la determinación de la potencia instalada y la capacidad de generación, en una PCH.

Hipótesis nula: La variabilidad climática no tiene influencia sobre los valores de caudal aprovechable para generación hidroeléctrica.

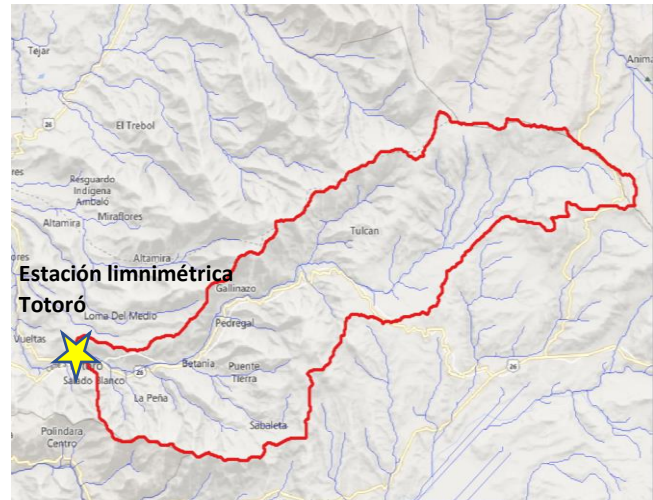
Variables: Caudal, potencia instalada, energía producida, variabilidad climática.

6.1 Descripción del lugar de estudio.

La zona de estudio está ubicada en el municipio de Totoró, departamento del Cauca, a 30 Km al nor-oriental de Popayán su capital y a 2750 msnm. Es una zona montañosa en la cordillera central de Colombia donde se asientan comunidades campesinas e indígenas de las etnias Nasa, Polindara y Totoró, organizadas en los resguardos de Totoró, Paniquitá, Jebalá, Novirao y Polindara. La precipitación promedio anual es de 2000mm. La temperatura media anual es de 16°C y se desarrollan actividades como la ganadería doble propósito (leche, carne), y la agricultura con el cultivo de diferentes especies de papa, ulluco y cebolla entre otras, que la hace un lugar de gran interés desde el punto de vista productivo y de conservación; por la altura en la que se encuentra hay cierta variedad de especies animales como el oso de anteojos, endémico del territorio y vegetación paramuna importante por lo que significa para el recurso agua (Totoró & Muñoz, 2016). Cerca de la zona de influencia del posible desarrollo hidroeléctrico hay varias lagunas como la de Calvache y Guanacas, corrientes como la del río Palacé y el Molino, además de un buen número de quebradas, algunas sin nombrar, que dan cuenta de la riqueza hídrica del lugar. (Alcaldía Municipal de Totoró, página web). Por ser zona montañosa y poseer recursos hídricos considerables, es susceptible de ser aprovechada en la generación de energía eléctrica.

Para la corriente del río El Cofre, objeto de este estudio, se conoce que el caudal promedio diario multianual registrado ha sido de 1.21m³/s, con un caudal máximo diario registrado de 21 m³/s y un mínimo histórico de 0.18m³/s, datos obtenidos del análisis de la serie histórica de caudales de la estación limnimétrica Totoró entre los años 1961 y 2020. En la figura 6 se muestra la ubicación del municipio de Totoró y la subcuenca correspondiente a la corriente El Cofre que sirve de base para el presente trabajo.

Figura 6. *Municipio de Totoró. Sub Cuenca río El Cofre.*



Subcuenca Estación Limnimétrica Totoró - QGIS

6.2 Revisión Bibliográfica

La búsqueda de material bibliográfico se realizó principalmente en la base de datos de ScienceDirect (SD). Las bases Redalyc y Google Scholar también fueron consultadas, pero el número de documentos en ellas encontrados fue menor. Se consideró que el hecho de ser artículos reportados en estas bases de datos es, en sí mismo, un criterio de calidad. Debido al inmenso número de artículos registrados en la base SD, se limitó la búsqueda a publicaciones asociadas con las ciencias de la tierra, medio ambiente, energía e ingeniería y se escogieron los artículos reportados en los últimos 15 años. La búsqueda se hizo por temas y se clasificaron los artículos obtenidos en relación con los objetivos específicos, así:

- Para determinar el caudal aprovechable la búsqueda se hizo en inglés usando las palabras environmental flow, environmental flow evaluation methods, determining environmental flow. Para este objetivo se entiende que la limitante en la determinación del caudal aprovechable en una fuente será el caudal ambiental, ecológico o de servidumbre. Se detectaron 342 artículos de los cuales se descartaron aquellos en los que el objetivo era determinar el caudal con base en principios ecológicos o biológicos. Se tuvo en cuenta el Estudio Nacional del Agua ENA 2022.
- Análisis de series de tiempo. Modelos ARIMA. La búsqueda se hizo en la plataforma de ScienceDirect con las siguientes palabras en inglés: ARIMA model, ARIMA flow discharge model, time series analysis, ARIMA accuracy. Se seleccionaron inicialmente 453 documentos que contenían el apartado de modelo ARIMA, pero solo 28 de ellos fueron específicos sobre hidrología o generales sobre el modelo ARIMA propiamente.

- Variabilidad climática. La revisión se centró en el tema de la evaluación de la variabilidad climática. Se descartaron los documentos en los que se consideraban los escenarios de cambio climático y la búsqueda se hizo con las palabras *climate variability*, *assessing climate variability*, *ENSO Phenomena*, *SPI index*, *climate variability and energy production*, *climate variability and flow discharge curve*. Se escogieron inicialmente 224 referencias.

De los temas arriba mencionados se encontraron documentos correspondientes a revisiones de literatura que por supuesto fueron atendidos dentro del análisis y evaluación de la bibliografía. En la tabla siguiente se resume la información sobre la bibliografía principal encontrada y revisada, resultado de aplicar una aproximación al método SALSA de revisión bibliográfica (García-Peñalvo, 2022).

Tabla 4. *Documentos encontrados y evaluados en la revisión bibliográfica.*

Tema	Objetivo	No. documentos encontrados	Criterios de exclusión	# de documentos seleccionados	Documentos revisados	% de uso
Caudal ambiental	1	342	Consideraciones biológicas, ecológicas, económicas. Modelamiento	38	12	31.6
Modelos ARIMA	2	453	Revisiones económicas	28	11	39.3
Variabilidad climática y generación de energía		224	Escenarios de cambio climático	26	18	69
Variabilidad climática y CDC	2	2	-----	2	2	100

6.3 Recolección de información hidrometeorológica.

Sobre la corriente el Cofre está instalada la estación limnimétrica Totoró manejada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, e identificada con el número 26027080. Cuenta con un registro de más de 60 años de caudal medio diario, tal como puede verse en la información registrada en el portal web del IDEAM, información de carácter abierto y de uso público. Los datos de caudal medio diario registrados desde el mes de mayo de 1961 y hasta diciembre de 2020, para la corriente El Cofre, se obtuvieron en formato XLS desde la base de datos manejada por el Instituto. Con base en la serie de caudales medios diarios se obtuvo la serie de caudales medios mensuales para la corriente El Cofre, con la cual se desarrolló el presente estudio. De esta misma plataforma se obtuvo información adicional como la serie de precipitación total mensual en las estaciones Totoró,

Silvia, Gabriel López y Polindara, vecinas a la cuenca de estudio, que cuentan con información continua desde el año 1986 y hasta el año 2022.

Para el análisis de variabilidad fue necesario recabar información de temperatura media del Océano Pacífico Tropical, específicamente para la zona El Niño 3.4, además de los valores del índice ONI reportados y compartidos mundialmente por la Oficina Nacional de Administración del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA) que cuenta con registros mensuales continuos desde 1950, los que pueden ser obtenidos consultando la página web de la misma. Los datos hidrológicos de la corriente, los hidrometeorológicos de la Cuenca, y los de temperatura del Océano Pacífico Tropical Zona 3.4 e índice ONI, se pueden consultar en el documento de Anexos en los apartados 1, 2 y 3 respectivamente.

6.4 Tratamiento de datos hidrometeorológicos.

Con base en la información hidrológica de la corriente se hizo el análisis descriptivo y de calidad de los datos en cuanto a datos faltantes, atípicos y análisis de normalidad, habiendo sido necesario completar el 3% de ellos lo cual se hizo a partir del promedio multianual del mes a completar; se hizo el diagrama de cajas y bigotes que detectó “atípicos” que no fueron eliminados porque, conocida la zona, eran valores posibles de haberse presentado y el análisis de normalidad con el que se demostró que la variable caudal no sigue ese tipo de distribución, lo que indicó la necesidad del uso de estadística no paramétrica para determinar correlaciones entre variables. La serie de caudal de la estación Totoró y los resultados de los análisis aquí mencionados se presentan en el anexo 1. El mismo procedimiento se replicó para la información obtenida de las estaciones pluviométricas Totoró, Silvia, Gabriel López y Polindara, de modo que pudiera ser usada para obtener la serie de precipitación mensual para la cuenca tributaria de la estación Totoró por el método de las isoyetas. La serie de precipitación para la Cuenca del río El Cofre se obtuvo utilizando el software ARCGIS PRO, así como PHYTON, mientras que para el tratamiento estadístico de los datos se usaron los programas SPSS, EVIEWS y EXCEL. Se hizo un análisis exploratorio de las series de caudal, precipitación y temperatura media del Océano Pacífico, para determinar las correlaciones estadísticas entre ellas que soportaran la escogencia de un método para determinar la variabilidad en la zona de estudio. Los análisis se hicieron a partir de pruebas estadísticas No Paramétricas dado que las series hidrológicas, por amplias que sean, no tienen un comportamiento normal (Vargas Mora et al., 2022.). En el anexo 2 se muestra la ubicación de las estaciones aledañas a la cuenca de estudio con base en las cuales se logró la obtención de la serie de precipitación total mensual desde el año 1986, las series logradas por el método de las isoyetas para la cuenca y el gráfico correspondiente a su distribución mensual y los valores atípicos.

6.5 Determinación de la variabilidad climática y anomalías

Con la revisión bibliográfica se detectaron los índices usados para definir la variabilidad. Sustentado en trabajos en los que se menciona la teleconexión entre el fenómeno ENSO y las condiciones meteorológicas en la zona andina colombiana, se decidió utilizar el índice ONI de la NOAA, para definir los períodos extraordinarios de variabilidad en la zona de estudio, además del índice de precipitación estándar, SPI, propio para la cuenca tributaria del cauce estudiado (Pérez-Ortiz et al., 2022; Zambrano Mera et al., 2018). En el anexo 3 se encuentran los registros de temperatura para la zona 3.4 del Océano Pacífico, con las anomalías mensuales correspondientes y la información del índice ONI obtenidos de la página de la NOAA con una periodicidad mensual, lo que obligó a manejar la información de caudales y precipitación en la cuenca con la misma frecuencia.

6.6 Análisis de series de tiempo

A partir de la información histórica de caudales medios mensuales en la estación Totoró, registrada desde el mes de mayo de 1961, se construyeron modelos de series de tiempo ARIMA sobre la serie transformada en logaritmos para eliminar la heterocedasticidad de la misma, después de haber aplicado la prueba estadística de raíces unitarias para comprobar la estacionariedad de la serie. Los modelos ARIMA considerados se obtuvieron de la revisión de los autocorrelogramas construidos para los caudales de la estación Totoró. Se analizaron los resultados de la simulación de los diferentes modelos candidatos a partir de los valores obtenidos para los estadísticos como el coeficiente de correlación R^2 , el Criterio de Información de Akaike y segundo coeficiente de Theil y se determinó el mejor modelo para describir la serie de caudales en la estación (Gupta & Kumar, 2022), todo lo cual se hizo utilizando el software EViews. Se construyeron modelos aplicando el efecto de la temperatura de la zona 3.4 del Océano Pacífico como predictora de la serie de caudales dada la correlación estadística obtenida entre las dos variables, se analizaron los resultados obtenidos y se escogió el modelo que, desde la estadística, representaba mejor la serie histórica de caudal en la fuente (Bouznad et al., n.d.).

Al mismo tiempo se hizo la transformación de la serie de precipitación de la cuenca para obtener una distribución normal de la misma que permitiera construir el índice de precipitación estándar (SPI), insumo base para determinar la variabilidad climática (Sobral et al., 2019).

6.7 Construcción de Curvas de Duración de Caudales y valoración de la potencia, energía y factor de planta en la PCH.

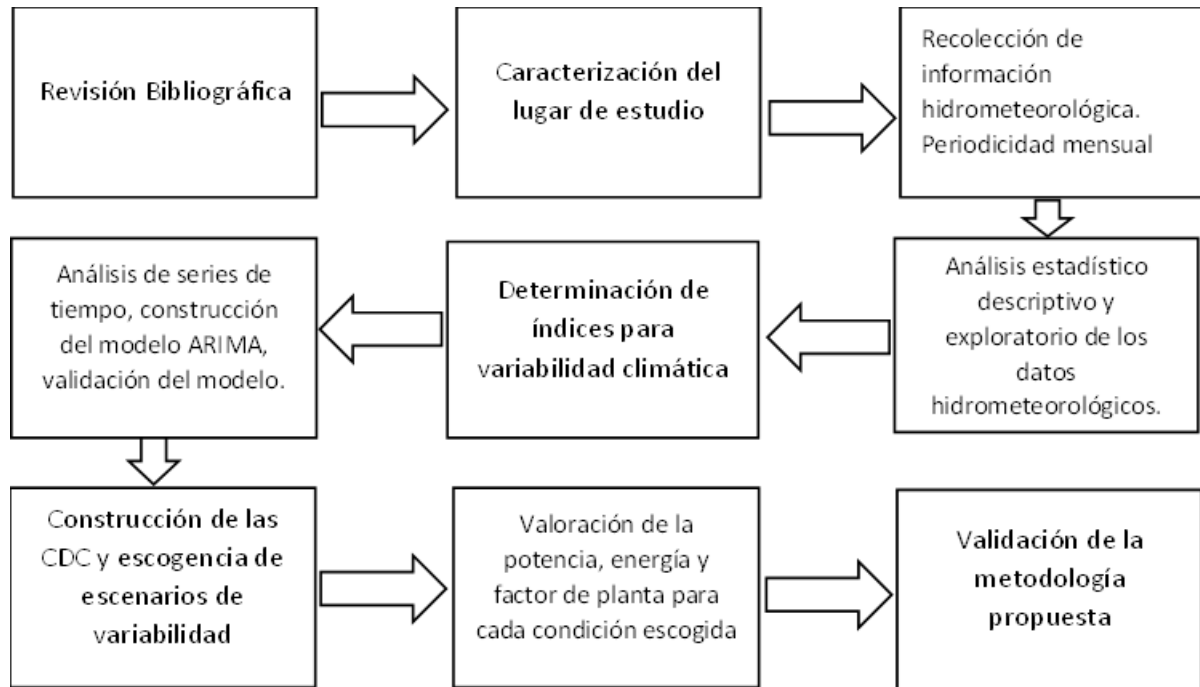
Se construyeron Curvas de Duración de Caudales (CDC) para distintas condiciones a saber: 1. CDC para la serie histórica de caudal registrada en la estación Totoró; 2. CDC para la serie sintética lograda a partir del modelo ARIMA seleccionado y sobre estas dos series se produjeron las CDC para los años hidrológicos húmedos y secos correspondientes con la ocurrencia de los fenómenos La Niña y El Niño respectivamente (Leong & Yokoo, 2021; Yildiz et al., 2023). De los resultados gráficos logrados se escogieron los escenarios más representativos de la variabilidad en el contexto de estudio y a partir de ellos se valoraron las magnitudes potencia, energía y factor de planta. Estos cálculos se hicieron bajo condiciones hidrológicas, no se tuvieron en cuenta para este análisis las restricciones técnicas por el tipo de maquinaria posiblemente usada en la PCH (Hernández & Carvajal-Serna, 2017).

6.8 Construcción y evaluación de la metodología propuesta

Con base en la fundamentación presentada anteriormente se planteó y evaluó la metodología para determinar el caudal aprovechable en proyectos de PCH bajo escenarios de variabilidad climática.

El diagrama de la figura 7 representa los pasos que se siguieron para desarrollar el trabajo objeto de este informe.

Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Identificación de las metodologías usadas en el ámbito mundial para la determinación de los caudales aprovechables en proyectos de PCH.

Cuando se trata de determinar la viabilidad de un proyecto energético habrá de conocerse el caudal que permite que una planta funcione a máxima potencia instalada (caudal de equipamiento) durante el mayor tiempo posible del año, esto es, lograr un factor de planta alto que permita el retorno de la inversión en el menor tiempo; pero este caudal estará limitado por las condiciones de sostenibilidad ecológica en la fuente y por el tipo de planta de generación y de maquinaria a utilizar. El diccionario Español de Ingeniería de la Real Academia de Ingeniería, define el caudal de equipamiento como el caudal establecido a partir de la curva de caudales clasificados, descontando el caudal ecológico, que es el caudal que debe circular como mínimo por el río durante todo el año. Sinónimo: caudal nominal. **Diccionario RAING.** Es evidente entonces que el caudal de equipamiento está directamente relacionado con el caudal ambiental, ecológico o de servidumbre del río, porque limita el caudal aprovechable. El mínimo caudal aprovechable será el que respeta las condiciones de conservación ambiental aguas abajo del desarrollo hidroeléctrico.

Para desarrollar este objetivo se hizo una revisión bibliográfica en la plataforma de ScienceDirect principalmente (ver apartado de metodología) atendiendo a los documentos publicados durante los últimos 15 años y excluyendo aquellos que abordaban la cuestión desde puntos de vista ecológicos, ambientales, holísticos y económicos. Se encontraron 342 artículos de los cuales 38 consideraban el asunto del caudal ambiental desde el punto de vista hidrológico, de este universo se usó el 31.6% de los artículos. Se encontraron más de 200 métodos registrados en la literatura mundial para determinar

los caudales ambientales que pueden clasificarse, según su enfoque, como hidrológicos, hidráulicos, de hábitat y holísticos (Młyński et al., 2021), así: los métodos hidrológicos, son sencillos pues utilizan variables hidrológicas como el caudal para su determinación; los hidráulicos que usan relaciones entre los elementos geométricos de la sección del cauce como el perímetro mojado y la hidráulica del mismo para encontrar ese caudal que protegería la ictiofauna; los métodos que consideran directamente las afectaciones en el ecosistema son complejos y dispendiosos, deben hacerse aforos de especies y además su clasificación, es un trabajo multidisciplinario que demanda grandes recursos de todo tipo; el método holístico conjuga los conocimientos e información de los demás métodos. Todos consideran el asunto de conservación ecológica y protección ambiental.

El estudio Nacional del Agua (ENA 2022) para Colombia, plantea que el caudal de servidumbre o ambiental (ecológico + otros usos básicos aguas abajo del emplazamiento) se establezca como aquel del percentil 85% o del 75% en la curva de duración de caudales, o sea un caudal que habrá de ser superado durante el 85 o el 75% del tiempo del año respectivamente (José Lozano Picón et al., n.d.), según el índice de regulación hídrica IRH de la cuenca (si alta regulación 75%), pero hay quienes sugieren usar aquellos correspondientes al percentil 90% y al 95% en la curva de duración de caudales (Książek et al., 2019; Temel et al., 2023). En la tabla 5 se presentan algunos de los métodos más comúnmente usados en el orden mundial para la determinación del caudal de servidumbre (Q_s), ecológico (Q_e) o ambiental, que como se mencionó anteriormente, determina el caudal aprovechable para una planta hidroeléctrica, siendo el método No.12 el que tradicionalmente se aplicaba en Colombia y el método No.6, el actualizado de acuerdo con el ENA 2022. En Pastor et al se menciona que el caudal límite por condiciones ambientales puede variar según la actividad productiva y la época del año, pudiendo incluso tomar el 40% del flujo durante períodos de bajo caudal y la condición ecológica se mantendría en buenas condiciones si el desarrollo es para irrigación (Pastor et al., 2014); Casanova y Figueroa 2015 determinan el caudal ambiental, correspondiente a cada mes, como el mínimo obtenido de entre los métodos (índices) usados en el ejercicio (Casanova O. & Figueroa C., 2015).

Tabla 5. *Métodos Hidrológicos para Determinar el Caudal Aprovechable - Caudal de Servidumbre (Qs) o Ambiental- en Proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas PCH.*

Método	Caudal de servidumbre, ecológico o ambiental	Caudal de aprovechamiento	Tipo	Referencia
1. Q ecológico	17.5% Q medio del río		Hidrológico	Palomeque et al
2. Q diseño		Promedio (Qmínimo, Q70% y Q80%) en la CDC	Hidrológico	Castillo
3. Q diseño	10% Q medio multianual	Caudal en un intervalo del 80 al 100% en la CDC modificada	Hidrológico	García Egocheaga
4. Q diseño		Q mínimo de la máquina a usar descontando el Qambiental	Ambiental, técnico	Arriaga, Iagua.es
5. Q ambiental	10% Q medio anual del río. 60% Q medio anual del río según época del año		Hidrológico	Tennant Method
6. Q ambiental	El caudal para el 75% - 85% del tiempo en la CDC dependiendo del IRH		Hidrológico	ENA 2018
7. Q generación	Q 90 - 95% del tiempo CDC		Hidrológico	Tennant Method
8. Q ecológico	7Q10		Hidrológico	Bethot et al. Młyński et al., 2021
9. Q ecológico	1/3 Caudal promedio en verano		Hidrológicos	Kuriqi et al., 2020
10. Q ecológico	5% Q medio anual		Hidrológicos	Kuriqi et al., 2020
11. Q ecológico	10% Q medio anual		Hidrológicos	Kuriqi et al., 2020
12. Q ecológico	25% Caudal medio anual		Hidrológicos	Kostrzewa's method. Kuriqi et al., 2020
13. Q ecológico	Q mínimo mensual		Hidrológicos	Kuriqi et al., 2020
14. Q ecológico	5% del caudal medio anual+ 10% caudal medio diario		Hidrológicos	Kuriqi et al., 2020
15. Q ecológico	20% caudal medio diario		Hidrológicos	Kuriqi et al., 2020

Nota: Caudal ecológico (Qe); Caudal medio diario (Qmd); Caudal medio mensual (QMM); Caudal medio anual (QMA); Caudal medio mensual multianual (QMMM).

Siendo este trabajo pensado para la determinación del caudal aprovechable en PCH bajo condiciones de variabilidad climática, se planteó el estudio y el análisis posterior tomando los métodos hidrológicos numerados en la tabla 5 así: 6, porque corresponde a la guía a emplear en Colombia según la legislación ambiental (ENA 2022); 7 y 9 porque son respectivamente los métodos que priorizan la generación hidroeléctrica (Chong et al., 2021; Karakoyun et al., n.d.; Kuriqi et al., 2019, 2020, 2021; X. run Zhang et al., 2021) y los métodos 14 y 15 porque son los que producen una menor afectación al ecosistema (Kuriqi et al., 2019), cubriéndose así un amplio rango de consideraciones útiles al momento de hacer la valoración de la energía, potencia y factor de planta para la PCH, en función del caudal aprovechable bajo escenarios de variabilidad climática, lo que implica una restricción que ofrecerá una visión diferente para decidir sobre la viabilidad de un proyecto hidro energético. En el apartado siguiente se propone la forma de abordar el efecto de la variabilidad climática y sus consecuencias sobre el caudal aprovechable para el desarrollo hidroeléctrico.

7.2 Estadística descriptiva y exploratoria, variables hidroclimatológicas: Cauce, Cuenca, Océano Pacífico.

Para plantear la metodología a seguir en la determinación del caudal aprovechable en un PCH bajo escenarios de variabilidad climática, se obtuvieron los datos correspondientes al caudal en la estación limnimétrica del IDEAM identificada con el número 26027080 y la precipitación en las estaciones aledañas a la cuenca de interés (véase anexo 2). Se hizo el análisis descriptivo de los datos de caudal para la estación Totoró desde el mayo de 1961 y hasta diciembre de 2020, del que resultó que el mínimo caudal medio mensual en la estación fue de 0.23 m³/s y el máximo de 4.5 m³/s, con un promedio multianual de 1.21 m³/s. El Anexo 1 contiene las series que soportan los resultados anteriores. Al tiempo se obtuvieron, de la página de la NOAA, los registros de temperatura media del Océano Pacífico en las zonas 3 y 3.4 (Ver anexo 3). Es conocido que existe relación entre la temperatura media del océano en estas zonas y la variabilidad climática interanual en la región Andina colombiana (Hugo Ramírez-Builes & Jaramillo-Robledo, 2009; José Edgar Montealegre Bocanegra, 2014). Una vez pasada esta etapa se hizo el análisis exploratorio para determinar si el comportamiento de la variable temperatura, indicativa del fenómeno ENOS, se relacionaba con el comportamiento de los caudales de la fuente y cuál de las dos zonas generaba mayor correlación. Las tablas 6 y 7 muestran los resultados obtenidos que permitieron definir el uso del índice ONI como indicador de períodos de anomalías en la zona de estudio.

Tabla 6. *Correlaciones: Temperatura Media del Océano Pacífico Zona 3 y Caudal medio Mensual*

		QMM m ³ /s	NINO3 °C
	Coefficiente de correlación	1.000	-,094*
	Sig. (bilateral)		0.012
	N	718	718
QMM m ³ /s	Coefficiente de correlación	-,094*	1.000
	Sig. (bilateral)	0.012	
	N	718	741
Rho de Spearman	NINO3 °C		

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 7. *Correlaciones: Temperatura Media del Océano Pacífico Zona 3.4 y Caudal Medio mensual*

		QMM m ³ /S	NIÑO 3.4 °C
		Coefficiente de correlación	1.000
		Sig. (bilateral)	-,160**
	QMM m ³ /S	N	718
Rho de Spearman		Coefficiente de correlación	-,160**
		Sig. (bilateral)	1.000
	NIÑO 3.4 °C	N	718
		718	741

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Los resultados presentados en las tablas 6 y 7 muestran la correlación de Spearman estadísticamente significativa, aunque de baja intensidad, entre las variables temperatura media del Océano Pacífico en las zonas 3 y 3.4 y el caudal medio mensual en la cuenca de estudio. El coeficiente de Spearman para variables No Normales, como los son las hidrológicas y climatológicas (Flores Tapia & Flores Cevallo, 2021; Vargas Mora et al., 2022), muestra valores de correlación de -0.094 con la zona 3 y de -0.16 para la zona 3.4 al nivel de significancia del 5% y del 1% respectivamente. Casanova y Figueroa encontraron una correlación significativa, en los mismo grados de significancia, entre los caudales del río Las Piedras en el municipio de Totoró en el Cauca y los índices para el fenómeno ENSO (Casanova O. & Figueroa C., 2015). Como el mayor valor de coeficiente se obtuvo para la zona 3.4, se respaldó la validez de usar el índice ONI para determinar los períodos de anomalías interanuales discriminados como El Niño y La Niña. Peña et al en su estudio sobre el índice ONI como una herramienta para generar alertas tempranas sobre el clima en plantaciones de café, encontraron que el departamento del Cauca en la zona entre los piedemontes de las cordilleras central y occidental presentaba el mayor efecto sobre las lluvias con un coeficiente de correlación de -0.56 (Peña-Q et al., 2015).

Es de notar que existe relación inversa entre la temperatura media del Océano Pacífico en las dos zonas y el caudal medio mensual en la fuente río El Cofre, lo que indica que incrementos en la temperatura del Océano Pacífico coinciden con decrementos en los valores observados de caudal en la cuenca de estudio. Esta comprobación de correlación abrió el camino para tratar de explicar la variable caudal, no solo a partir de su información histórica, sino, además, considerando la temperatura del Océano Pacífico como una variable exógena predictora del comportamiento de la variable de interés para este caso.

7.3 . Variabilidad climática. Períodos de anomalías e índice SPI.

Con base en la información obtenida de página de la NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos de Norte América, sobre temperatura superficial del Océano Pacífico en las diferentes zonas, se construyeron las gráficas las figuras 8 y 9 que muestran los períodos de anomalías para la zona N3.4 del Océano Pacífico, que presentó la mayor correlación con el valor de caudal en la fuente, y el correspondiente índice ONI para determinar la presencia de los fenómenos asociados al ENSO, El Niño Oscilación del Sur, en sus distintos períodos. Las anomalías positivas correspondientes al calentamiento de la superficie del Océano Pacífico son determinantes

del fenómeno El Niño; anomalías negativas, correspondientes al enfriamiento de la superficie del Océano Pacífico son determinantes del fenómeno La Niña.

Figura 8. Anomalías de temperatura del Océano Pacífico en la zona 3.4.

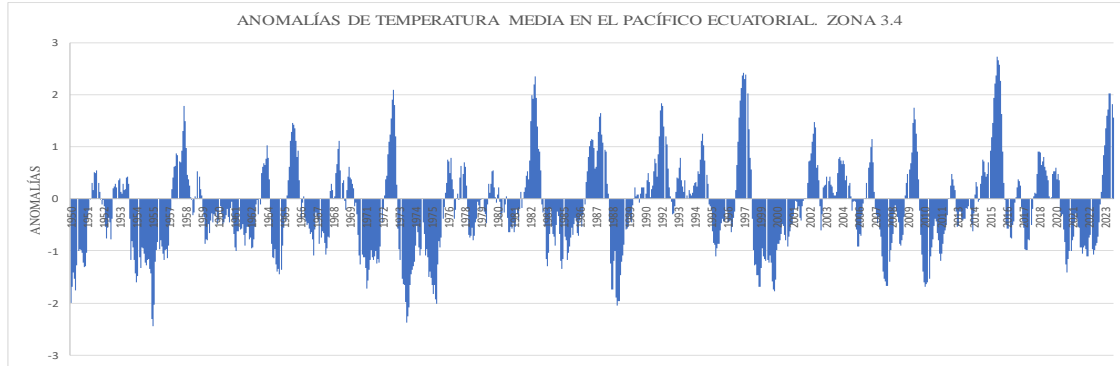
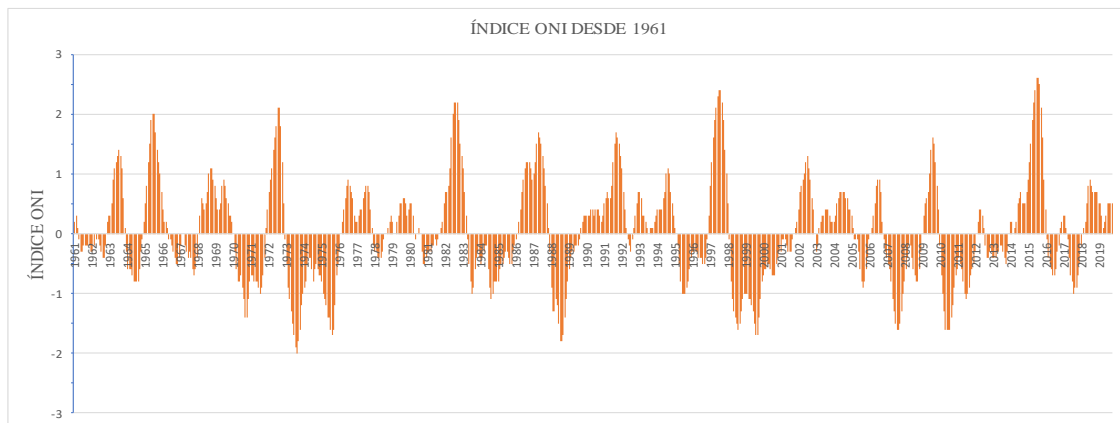


Figura 9. Índice ONI



Las figuras anteriores muestran que los períodos de anomalías negativas (enfriamiento de la superficie del Océano Pacífico) son más frecuentes que aquellas positivas en la zona 3.4 del Océano Pacífico. Dado que se ha documentado la influencia de los fenómenos ENSO sobre los valores de caudal en la zona Andina colombiana, en la figura 10 se presenta la serie de caudal medio mensual en la fuente y el índice ONI para el mismo período, como una aproximación inicial a la explicación de los valores de caudal en la fuente por la variación de la temperatura superficial del océano Pacífico en la zona 3.4. Parece una coincidencia sobre los caudales altos cuando el índice ONI define la presencia del fenómeno La Niña. (Cerón et al., 2020; Hugo Ramírez-Builes & Jaramillo-Robledo, 2009b; Sebastián & Moreno, 2021).

La figura 11 muestra la variable precipitación total mensual normalizada para la cuenca del río El Cofre, obtenida por el método de las isoyetas con base en la precipitación total mensual de las estaciones aledañas a la cuenca estudiada y el índice SPI correspondiente, y la figura 12 el caudal medio mensual en la estación Totoró y los valores de SPI obtenidos para el mismo período. La

clasificación en distintos grados de intensidad está determinada a partir de los valores de SPI obtenidos, siendo períodos normales aquellos con índices entre -1 y 1; valores de SPI mayores que 1 representan períodos considerados húmedos y valores de SPI menores que -1 representan períodos secos (Mukhawana et al., 2024).

Figura 10. Caudal medio mensual en la estación Totoró e índice ONI.

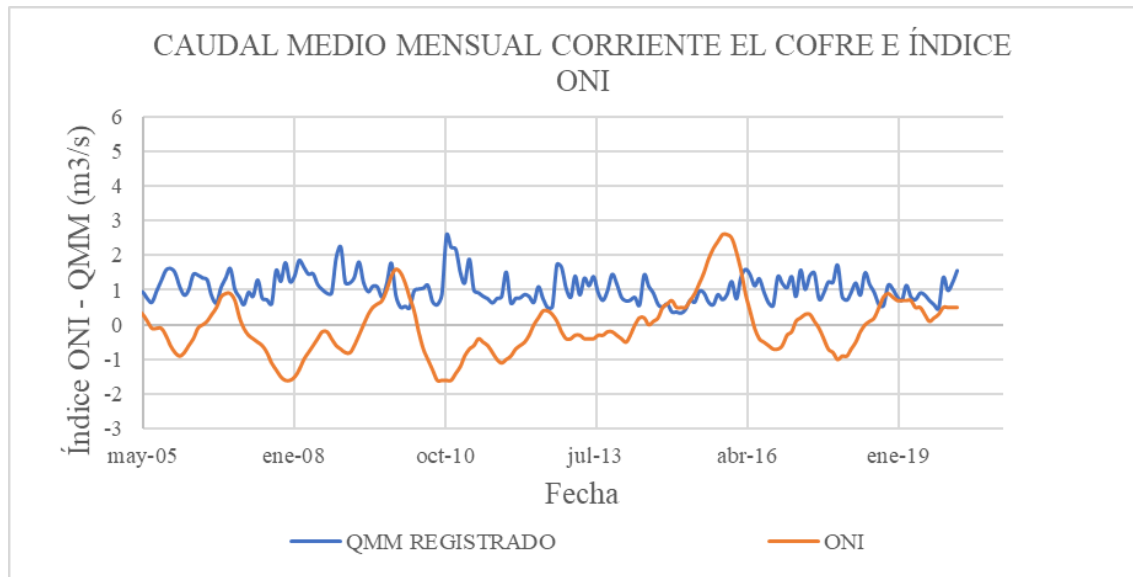


Figura 11. Índice de Precipitación Estándar SPI, para la corriente del río El Cofre. Estación Totoró.

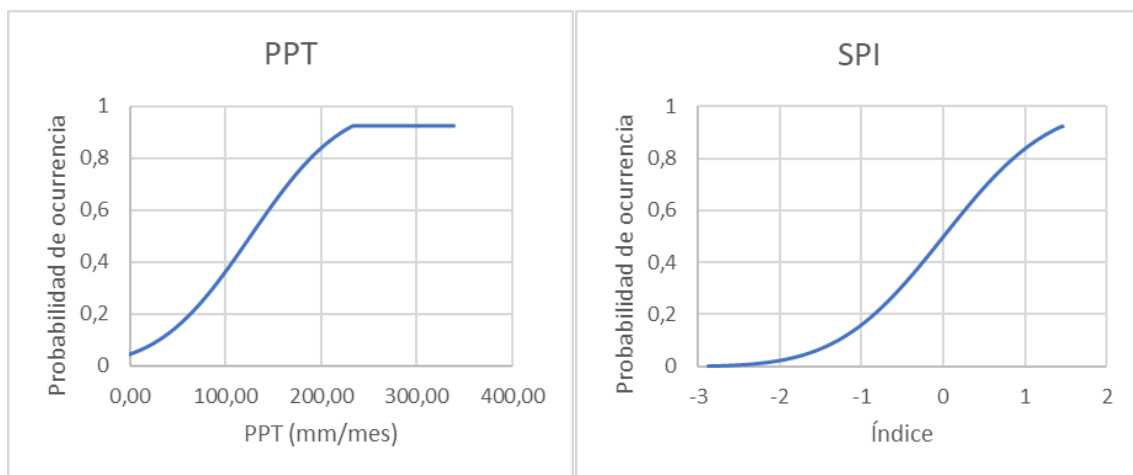
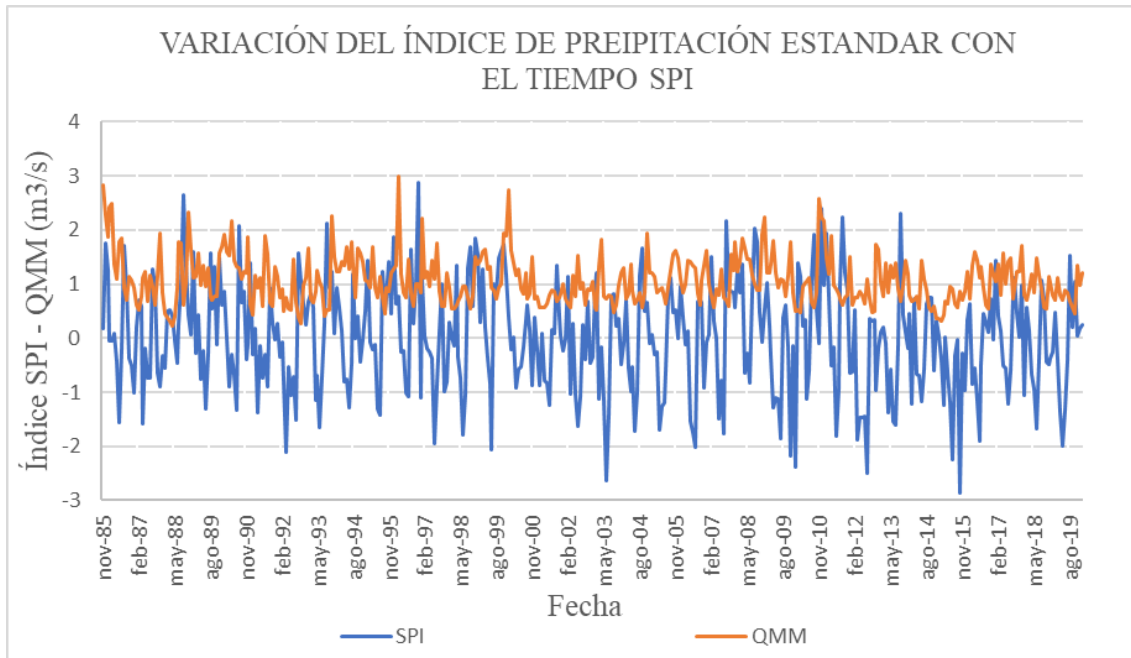


Figura 12. Índice de Precipitación Estándar SPI y caudal en la corriente El Cofre.



De las gráficas anteriores de precipitación e índice SPI, determinado para la agregación mensual tal como se tienen los datos de caudal, los períodos que podrían clasificarse entre sequía moderada y extrema son los más y parecen más frecuentes e intensos hacia los últimos tiempos, mientras que atendiendo a la variación del índice ONI parece contraria la situación, pues la curva muestra más períodos de anomalías negativas asociados a períodos La Niña.

7.4 Resultados Modelado ARIMA

Esta sección muestra los resultados del análisis de series de tiempo a través de los modelos ARIMA para pronosticar los valores de la serie analizada. La determinación del modelo se hizo para la serie histórica de caudal (en logaritmos para menguar la heterocedasticidad), que cumple con la condición de continuidad definida para una serie de tiempo. Una serie que por definición es estacionaria, tal como lo reportó el test de raíces unitarias del que se muestra el resultado en la tabla 10, por lo cual no hubo lugar a diferenciación de la serie, produciendo un orden I (0). Cumplida la condición de estacionariedad, necesaria para la construcción de un modelo ARIMA, se revisaron los gráficos de la Función de Autocorrelación FAC y la Función de Autocorrelación Parcial FACP mostrados en la figura 13, para definir los posibles modelos ARIMA, que se reportan en la tabla 9, donde se indica para cada término el máximo rezago significativo.

Tabla 8. Resultados del test de raíces Unitarias de Dickey-Fuller

Null Hypothesis: LY has a unit root
 Exogenous: Constant
 Lag Length: 13 (Automatic - based on SIC, maxlag=19)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-6.304271	0.0000
Test critical values: 1% level	-3.439572	
5% level	-2.865500	
10% level	-2.568935	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Nota: Como el valor de t calculado es mayor en valor absoluto al t crítico en valor absoluto, se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que la serie es estacionaria.

Figura 13. Autocorrelogramas Simple y Parcial. Caudal medio mensual en logaritmos.

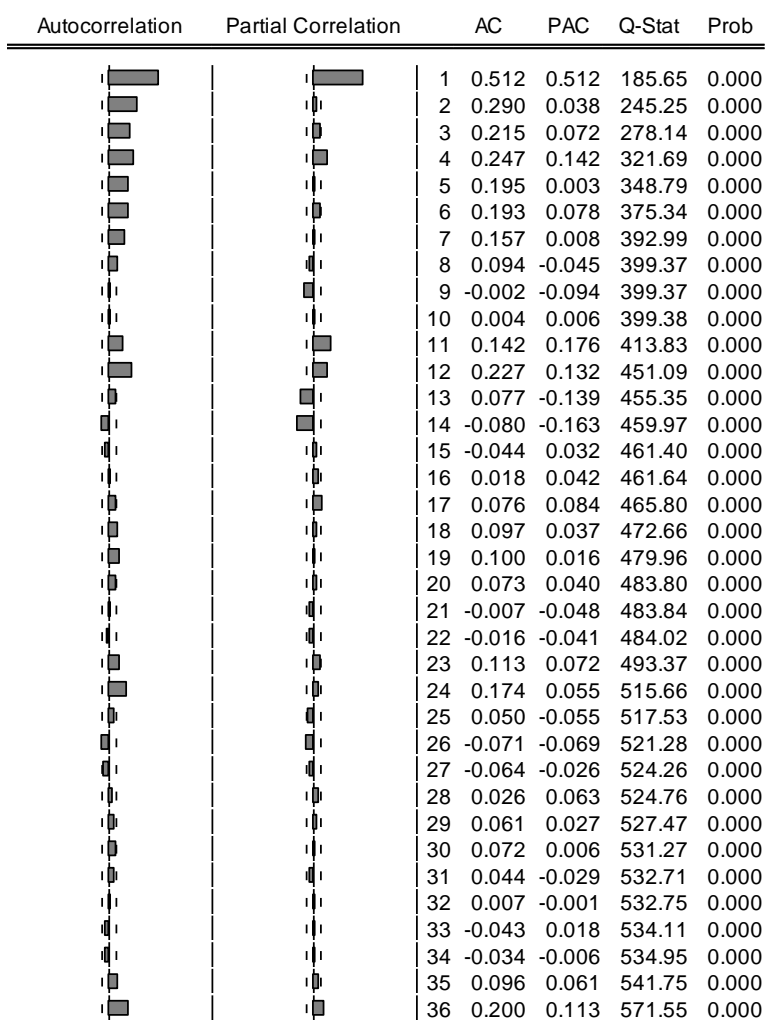


Tabla 9. Posibles modelos ARIMA

COMPONENTE AR	COMPONENTE MA	MODELOS ARIMA
1	1	(1,0,1)
4	12	(1,0,12)
11	24	(1,0,24)
12		(4,0,1)
14		(4,0,12)
		(4,0,24)
		(11,0,1)
		(11,0,12)
		(11,0,24)
		(12,0,1)
		(12,0,12)
		(12,0,24)
		(14,0,1)
		(14,0,12)
		(14,0,24)

El proceso de determinación del mejor modelo ARIMA es iterativo y por más de que las FAC y FACP muestren un posible orden del modelo, es a partir del análisis de los estadísticos que puede hacerse la escogencia del mejor. Del cálculo de los modelos indicados en la tabla 9 se encontró que otros producían mejores resultados, que pueden ser explicados porque a veces un rezago aparentemente significativo esconde la dependencia real de un rezago adyacente. En adelante se muestran los resultados de los que arrojaron mejores estadísticos.

- Modelo ARIMA (24,0,24), indica que los rezagos máximos que explican los valores de la serie son los de los 24 meses en las componentes AR y MA. La ecuación resultante del modelo se obtiene a partir de los valores de los parámetros de cada uno de los rezagos apreciados significativos a partir del correlograma, o a partir de los estadísticos obtenidos para las variables. Los resultados correspondientes a este modelo se aprecian en la tabla 10 a partir de los cuales fue posible formular la ecuación del modelo que se presenta en seguida de la tabla. De esta misma forma se trabajó para desarrollar los modelos que se indican adelante.

Tabla 10. Estadísticos del Modelo ARIMA (24,0,24) en logaritmos

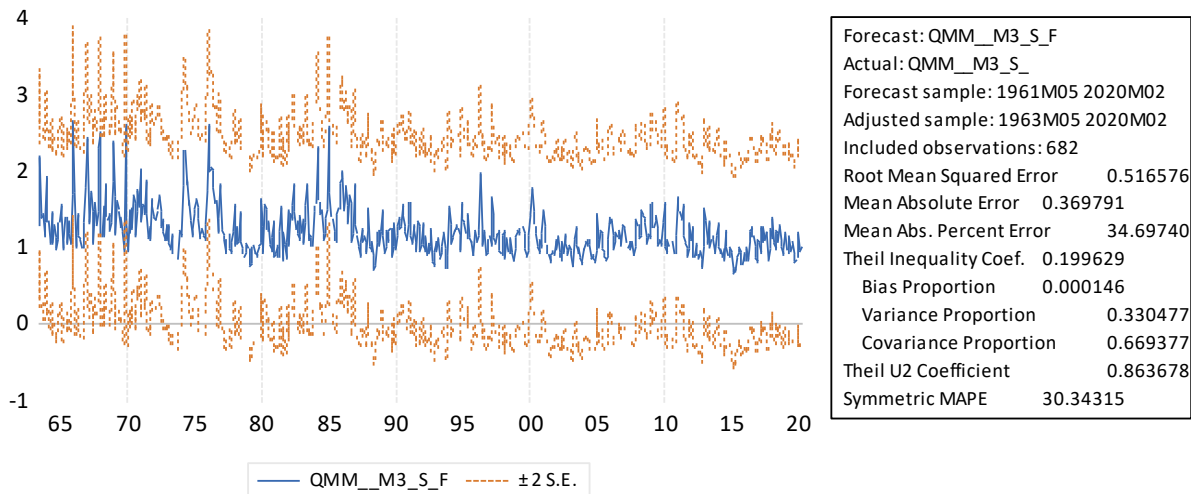
Coefficient covariance computed using outer product of gradients

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.084629	0.056965	1.485633	0.1378
AR(1)	0.580728	0.059181	9.812799	0.0000
AR(4)	0.087477	0.036788	2.377897	0.0177
AR(11)	0.063746	0.039232	1.624833	0.1047
AR(12)	-0.102120	0.061934	-1.648854	0.0996
AR(24)	0.050652	0.053285	0.950586	0.3421
MA(1)	-0.118148	0.071100	-1.661726	0.0970
MA(12)	0.268966	0.072481	3.710868	0.0002
MA(24)	0.053681	0.067289	0.797775	0.4253
SIGMASQ	0.139951	0.007539	18.56433	0.0000

R-squared	0.325678	Mean dependent var	0.082779
Adjusted R-squared	0.316958	S.D. dependent var	0.455892
S.E. of regression	0.376778	Akaike info criterion	0.901293
Sum squared resid	98.80555	Schwarz criterion	0.965877
Log likelihood	-308.1565	Hannan-Quinn criter.	0.926249
F-statistic	37.34971	Durbin-Watson stat	2.000546
Prob(F-statistic)	0.000000		

Ecuación del Modelo y gráficos de la serie simulada

$$\begin{aligned} \text{Log } Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = & 0.08463 + 0.58073Q_{t-1} + 0.08748Q_{t-4} + 0.06375Q_{t-11} \\ & - 0.10212Q_{t-12} + 0.05065Q_{t-24} - 0.11815Q_{t-1} \\ & + 0.26897Q_{t-12} + 0.05368Q_{t-24} \end{aligned} \quad (6)$$



El ajuste global del modelo muestra un R^2 igual a 0.317, un valor del criterio de información de Akaike igual a 0.901 y un coeficiente de Theil de 0.863. Además, de los otros resultados estadísticos obtenidos para este modelo se observan valores de probabilidad mayores del 10% para algunos de

los coeficientes de las variables, que son indicativos de errores relativamente altos, de modo que en las siguientes iteraciones se eliminaron aquellos términos y bajo la consideración de que la información es mensual y puede estar sujeta a fenómenos estacionales, se exploró también un modelo SARIMA, el cual recoge estas posibles eventualidades dentro de esta periodicidad. De acuerdo con las funciones FACS y FACP se eligió un modelo SARIMA (14, 0,13) el cual arroja mejores resultados estadísticos, tal como se observa en la tabla 11.

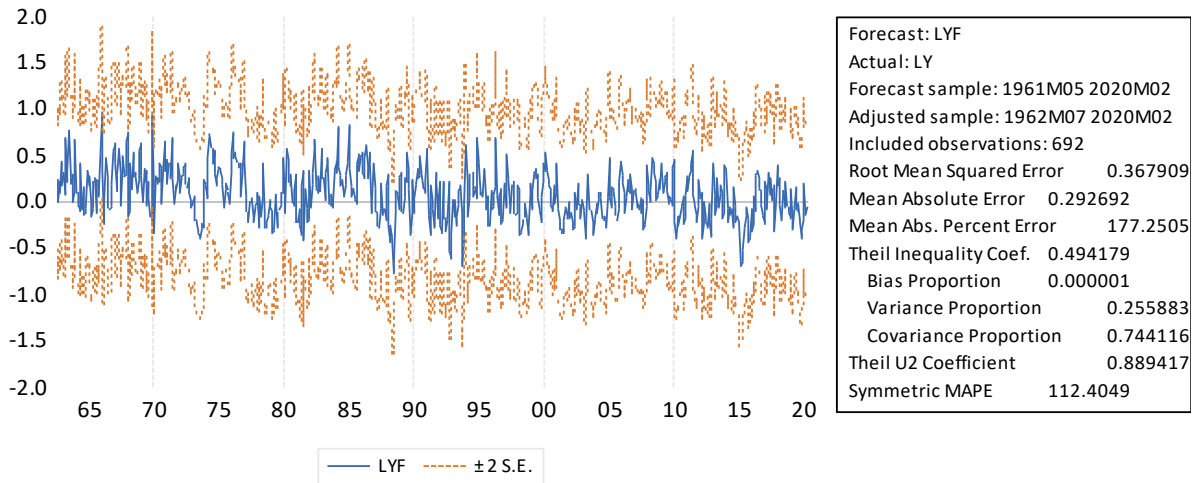
- Modelo SARIMA (14,0,13). Estadísticos, ecuación y gráficos del modelo.

Tabla 11. *Estadísticos del Modelo SARIMA (14,0,13)*

Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.082516	0.042667	1.933963	0.0535
AR(1)	0.489172	0.028161	17.37062	0.0000
AR(4)	0.119433	0.032964	3.623190	0.0003
AR(11)	0.093724	0.037572	2.494520	0.0128
AR(12)	0.194433	0.039586	4.911665	0.0000
AR(14)	-0.199675	0.032764	-6.094252	0.0000
MA(13)	-0.123566	0.041328	-2.989870	0.0029
SIGMASQ	0.135785	0.007204	18.84874	0.0000
R-squared	0.346105	Mean dependent var		0.082271
Adjusted R-squared	0.339538	S.D. dependent var		0.456016
S.E. of regression	0.370599	Akaike info criterion		0.866254
Sum squared resid	95.72829	Schwarz criterion		0.917978
Log likelihood	-297.3546	Hannan-Quinn criter.		0.886242
F-statistic	52.70302	Durbin-Watson stat		2.071749
Prob(F-statistic)	0.000000			

Ecuación del modelo y gráficos de la serie simulada

$$\begin{aligned} \text{Log } Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = & 0.08252 + 0.48917Q_{t-1} + 0.11943Q_{t-4} + 0.09372Q_{t-11} \\ & + 0.19443Q_{t-12} - 0.19967Q_{t-14} - 0.12357Q_{t-13} \end{aligned} \quad (7)$$



El ajuste global del modelo muestra un R^2 igual a 0.339 un criterio de información de Akaike de 0.866 y coeficiente de Theil de 0.889, además los valores de probabilidad de cada una de las variables del modelo indican errores menores que el 10 %, así que se considera un mejor ajuste que el del modelo ARIMA (24,0,24) indicando así que si existe un componente estacional en la serie de caudales.

A partir de los estadísticos obtenidos para los modelos anteriores resulta que el mejor es el SARIMA (14,0,13), pues presenta el valor más alto de R^2 y el menor valor del criterio de Información de AKAIKE, además, atendiendo al principio de parsimonia, se prefiere el modelo más sencillo al más complejo.

Dado que se verificó una correlación estadística significativa con la temperatura media en la zona 3.4 del Océano Pacífico ecuatorial, se planteó un modelo SARIMAX que explica la variable caudal en su condición estacional, con la influencia de la variable exógena temperatura en esa zona y el mejor modelo obtenido fue el SARIMAX (14,0,13) que explica los valores de la variable a partir del rezago 14 en la parte AR y del 13 en la componente MA. En la tabla 12 se muestran los resultados de los parámetros y los estadísticos generales obtenidos para este modelo.

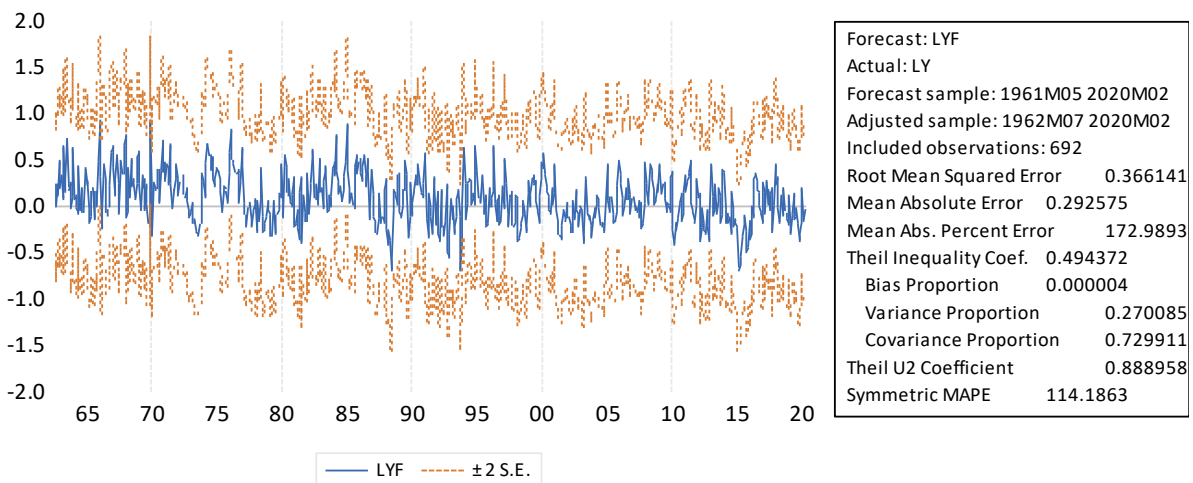
- Modelo SARIMAX (14,0,13) con la variable exógena la temperatura en la zona 3.4 del Océano Pacífico. Estadísticos, ecuación y gráficos del modelo.

Tabla 12. *Estadísticos del Modelo SARIMAX (14,0,13) Temperatura zona 3.4 como variable exógena*

Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.890148	0.749488	2.521920	0.0119
TEMP34	-0.067008	0.027834	-2.407437	0.0163
AR(1)	0.475657	0.028626	16.61623	0.0000
AR(4)	0.107065	0.033695	3.177461	0.0016
AR(11)	0.095219	0.036631	2.599384	0.0095
AR(12)	0.202265	0.039052	5.179409	0.0000
AR(14)	-0.205337	0.032451	-6.327539	0.0000
MA(13)	-0.123740	0.041810	-2.959609	0.0032
SIGMASQ	0.134710	0.007158	18.81850	0.0000
R-squared	0.350933	Mean dependent var		0.082779
Adjusted R-squared	0.343484	S.D. dependent var		0.455892
S.E. of regression	0.369390	Akaike info criterion		0.861178
Sum squared resid	95.10494	Schwarz criterion		0.919303
Log likelihood	-294.9957	Hannan-Quinn criter.		0.883638
F-statistic	47.10622	Durbin-Watson stat		2.061327
Prob(F-statistic)	0.000000			

Ecuación del modelo y gráfico de la serie simulada

$$\begin{aligned} \text{Log } Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = & 1.89015 - 0.067008 * \text{temp}_{\text{zona } 3.4} + 0.47566Q_{t-1} \\ & + 0.10706Q_{t-4} + 0.09522Q_{t-11} + 0.20226Q_{t-12} \\ & - 0.20534Q_{t-14} - 0.12374Q_{t-13} \end{aligned} \quad (8)$$



El ajuste global del modelo muestra un R^2 igual a 0.343 un valor del criterio de información de Akaike de 0.861 y coeficiente de Theil de 0.889.

Para escoger el modelo que pueda considerarse representativo de la serie de datos de caudal en el cauce del río El Cofre, se resumieron en la tabla 13 algunas de las estadísticas obtenidas para aquellos considerados candidatos.

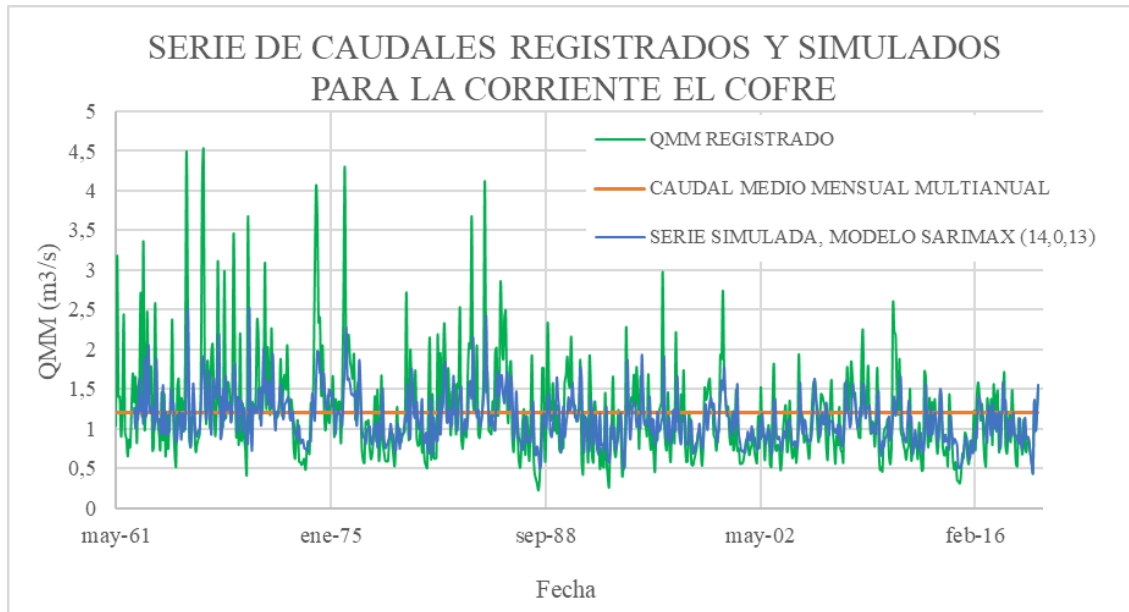
Tabla 13. *Resultados estadísticos de los modelos ARIMA considerados.*

MODELO	R2 AJUSTADO	CRITERIO DE INFORMACIÓN DE AKAIKE	COEFICIENTE DE THEIL
ARIMA (24,0,24)	0.317	0.901	0.864
ARIMAX (14,0,13)	0.339	0.866	0.889
SARIMAX (14,0,13) TEMPERATURAZ3.4	0.343	0.861	0.889

Los resultados mostrados en la tabla anterior indican que cada uno de los modelos explica una variable compleja, por eso el valor relativamente bajo del R^2 y el criterio de Akaike demuestra el grado de pérdida de información, así, un modelo más robusto presentará un criterio de Akaike más bajo. Además, el coeficiente de Theil menor que uno indica que el modelo no es una caminata aleatoria, de modo que los tres presentados si sirven para explicar los caudales, aunque su ajuste no es perfecto, lo que puede reflejarse en el hecho de que no replican los valores máximos de las series. Lo que se espera de un modelo ARIMA, con sus variantes, entiéndase SARIMA o SARIMAX para el presente estudio, es que el valor de R^2 sea lo más alto posible y que el criterio de información de Akaike lo más bajo posible, así que el modelo que mejor representa la serie Caudal Medio Mensual para la corriente El Cofre es el SARIMAX (14,0 13) con la temperatura media en la zona 3.4 del Océano Pacífico como variable predictora. O sea que la temperatura si explica los caudales presentados en la corriente, además de que, mientras la temperatura del océano decrece, los caudales en la fuente aumentan, lo que corresponde con el comportamiento observado en la variable para la Zona Andina colombiana bajo este tipo de circunstancias, así que la ecuación presentada en logaritmos para este modelo, es la representativa desde el punto de vista estadístico para simular valores de caudal en la fuente, y definir un escenario especial de análisis en el que no se replican los valores máximos de la serie histórica, tal como sucede con el análisis de otras variables del orden hidrológico, hidráulico y de calidad de agua a partir de modelos ARIMA en el que hay presencia de valores “atípicos”.(Aguirre Gómez, 1993; Ghimire, 2017). Zafra et al comentan que, de no considerar el efecto de esos valores, en un análisis de turbiedad, el coeficiente R2 puede ser tan bajo como 0.206(Zafra-Mejía et al., 2024).

En adelante se presentan los resultados detallados del modelo SARIMAX (14,0,13) escogido para representar la serie de caudales en el cauce del río El Cofre. La figura 14 muestra la serie de caudales simulados por el modelo y los históricos registrados y en el anexo 5 se presentan las tablas correspondientes a los resultados de la simulación de la variable obtenida por el modelo.

Figura 14. Serie de caudales registrados y simulados con el modelo SARIMAX (14,0,13)



El modelo SARIMAX tiene en cuenta los valores observados en todos los períodos, o sea en aquellos conocidos como La Niña, El Niño y los considerados como Neutros y si bien del gráfico de la figura 14 se observa que el modelo obtenido no replica los valores extremos de la serie histórica, si es representativo de la misma, pues los estadísticos obtenidos así lo demuestran. Esta reportado en la literatura que los modelos ARIMA presentan una falta de precisión cuando existen valores atípicos en la serie, por lo que suele hacerse una revisión del tipo de ellos para ser corregidos y lograr una mejor predicción en el modelo (Ahmar et al., 2018), pero en el caso de análisis que compete a este trabajo los valores de la serie no deberían ser corregidos, pues son valores posibles dentro de la serie para la estación estudiada. No puede determinarse un modelo ARIMA o ARIMAX para la información correspondiente a los períodos en que se conoce la ocurrencia de los fenómenos de variabilidad El Niño, La Niña y Neutros, pues no son continuos en el tiempo, luego se estaría violando la condición necesaria de continuidad de la serie, para hacer un análisis estadístico con resultados plausibles(Kedam et al., 2024).

Tratándose este trabajo de determinar el caudal aprovechable bajo escenarios de variabilidad climática y a partir del análisis de los resultados obtenidos para el modelo SARIMAX, comparados con los registrados en la fuente para la serie histórica, se observa que los valores extremos, máximos y mínimos, no se replican en magnitud por el modelo, aunque este sí sigue el patrón en el tiempo. Además, existe una diferencia en cuanto a los valores registrados para cada uno de los períodos de excepción (El Niño y La Niña), pues aparecen, por ejemplo, caudales más bajos para períodos La Niña que aquellos registrados en períodos caracterizados por anomalías positivas, El Niño y viceversa. De modo que los períodos de variabilidad considerados como El Niño, La Niña y Neutros no se reflejan en la fuente exactamente en el tiempo de ocurrencia, según el índice ONI. Estas características se observan para la serie registrada en la estación como para los resultados simulados por el modelo, como puede verse en las figuras 15 y 16. Gaviria et al en la determinación de la variabilidad de la curva de duración de caudales por efectos estacionarios en Colombia reportan que la disminución en los caudales debido a la fase cálida del fenómeno puede tener un rezago de hasta tres meses(Gaviria & Carvajal-Serna, 2020).

Figura 15. Caudal medio mensual registrado en la estación Totoró e índice ONI.

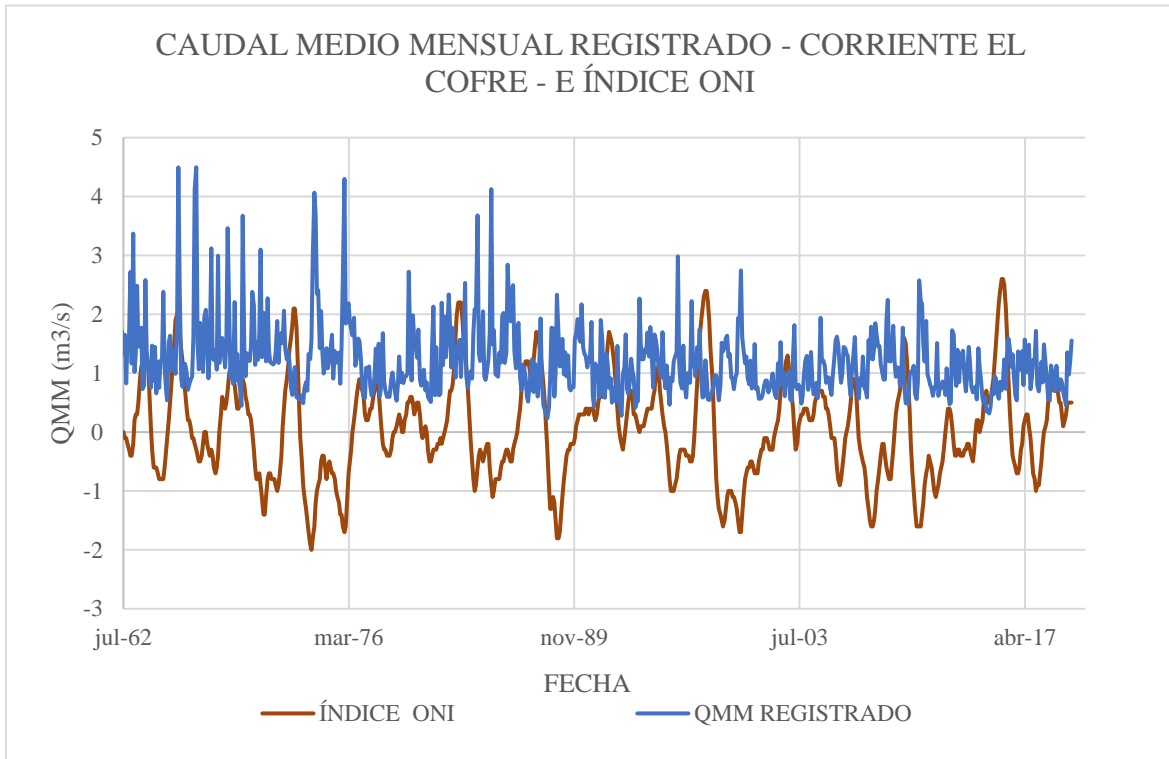
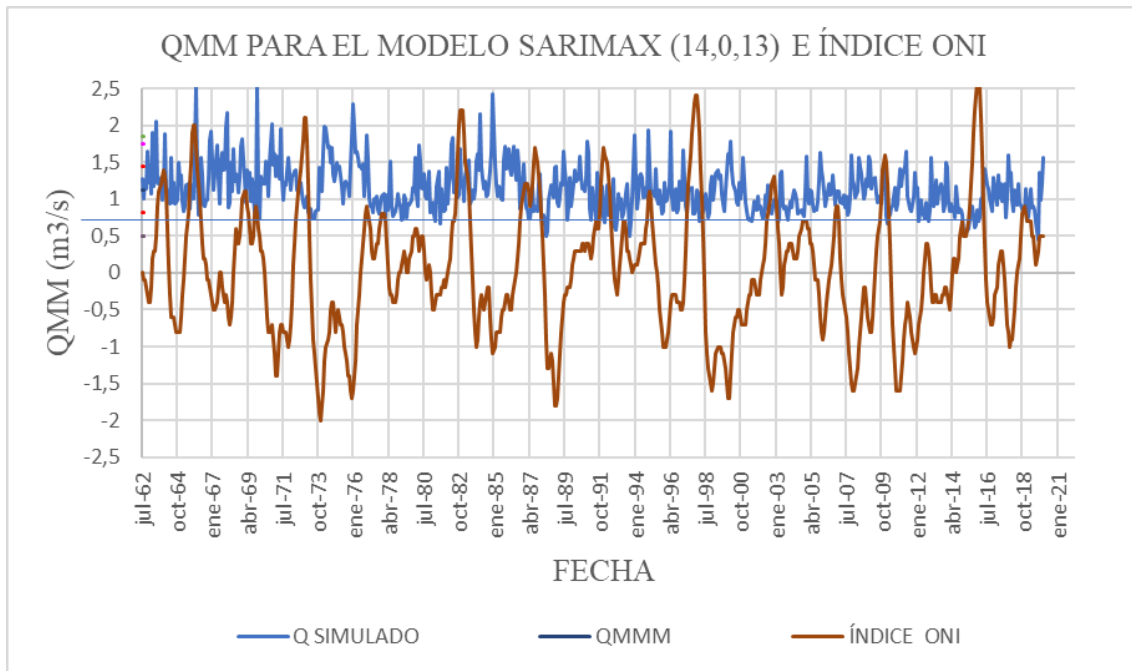
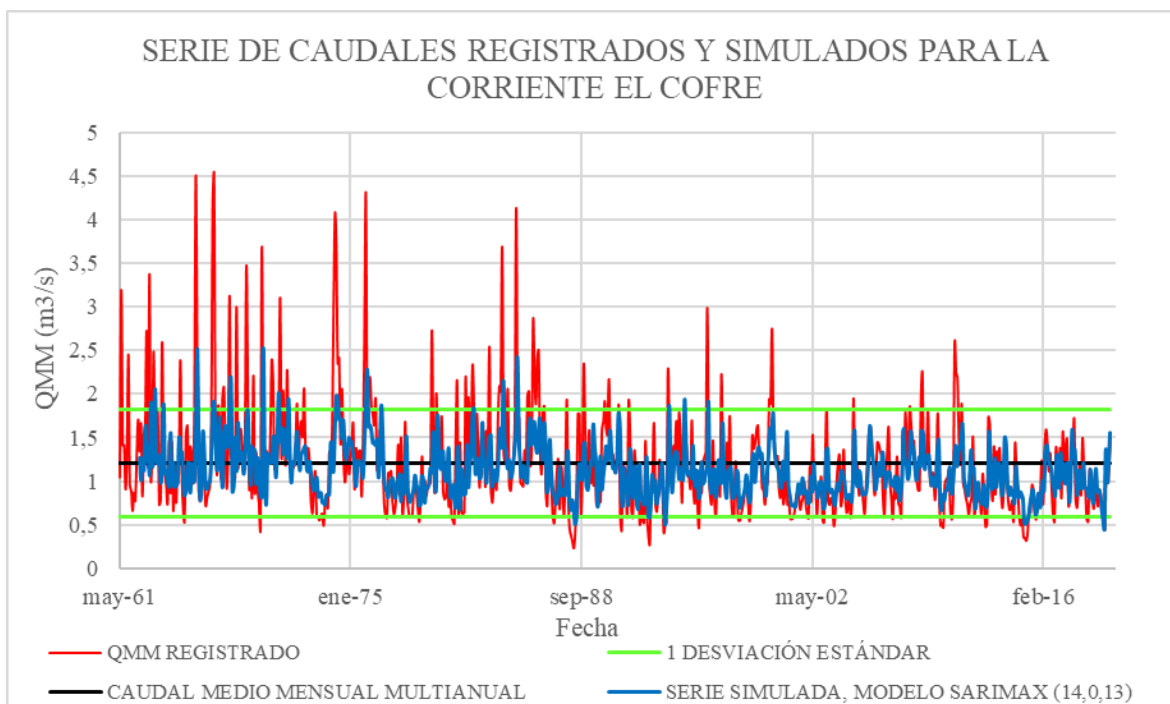


Figura 16. Caudal medio mensual simulado por el modelo SARIMAX (14,0,13) e índice ONI



De la gráfica comparativa entre caudales históricos y simulados por el modelo, mostrada en la figura 17, se aprecia claramente que el rango de variabilidad de los caudales simulados está entre -1σ y $+1\sigma$ (σ desviación estándar) del caudal medio mensual multianual histórico registrado, considerada variación natural no extrema que representa un nivel de confianza superior al 95%. Este resultado indica que el modelo SARIMAX elimina la posible variabilidad ocurrida en períodos extraordinarios y genera un escenario de NO VARIABILIDAD que es conveniente considerarlo en el análisis de generación hidroeléctrica por los efectos que de él puedan derivarse sobre la restricción por uso del caudal en la fuente.

Figura 17. Serie histórica y simulada de caudales para la fuente rio El Cofre.

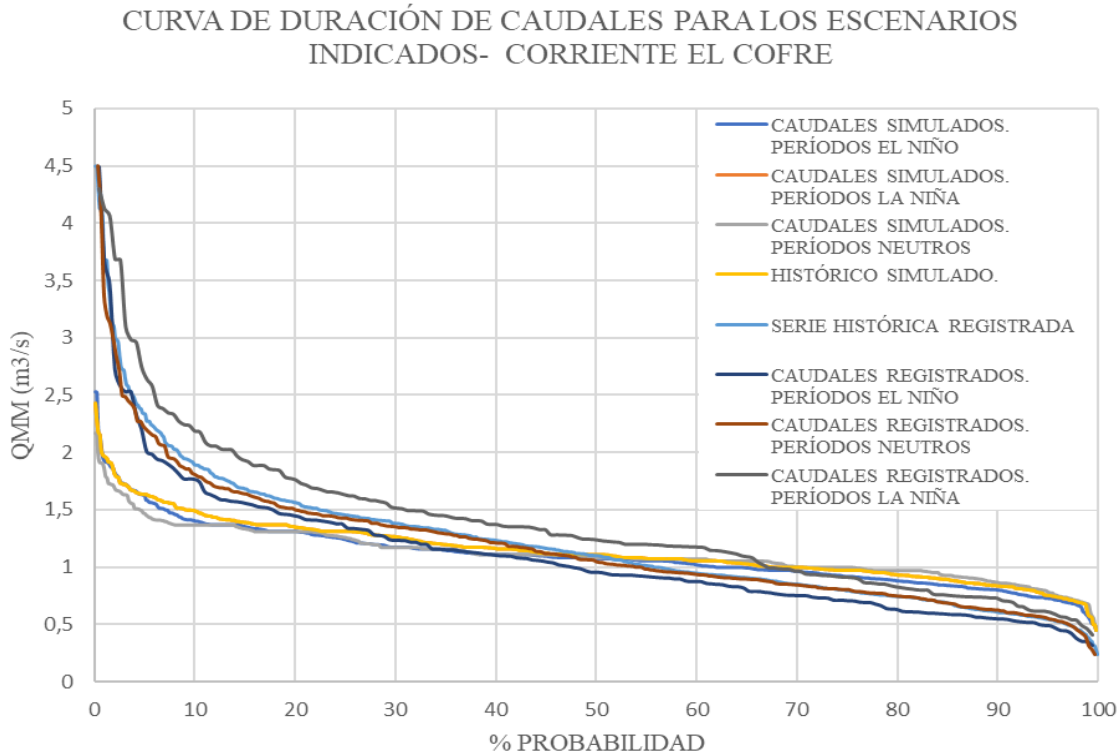


7.5 Curva de duración de Caudales, escenarios de variabilidad y caudal aprovechable.

Para hacer el análisis del efecto de la variabilidad climática sobre el valor de caudal aprovechable, que determina la potencia y la energía producida por una PCH, se construyeron curvas de duración de caudales para la serie histórica, la simulada por el modelo SARIMAX y las correspondientes a los períodos de variabilidad determinados por la influencia del fenómeno ENOS e identificados a partir del índice ONI, períodos conocidos como La Niña, El Niño y los Neutros. En la figura 18 se muestran las curvas para las condiciones mencionadas, que se constituyen en los escenarios de variabilidad a ser estudiados. De las curvas obtenidas pueden notarse diferencias considerables en los valores extremos, o sea en las colas de las mismas, principalmente para los escenarios históricos, mientras que la variación es mucho menos perceptible para aquellos obtenidos a partir de la serie simulada, lo que era de esperarse pues fue evidente el efecto de atenuación de la variabilidad extrema producida por el modelo SARIMAX sobre los valores de caudal esperados en la fuente, aunque la variación en el valor del caudal medio mensual multianual está al rededor del 10% para ambas situaciones, lo que

considera como una buena aproximación desde la estadística(Chong et al., 2021; Habeeb et al., 2024)(Kwakye & Bárdossy, 2022).. En el Anexo 6 pueden consultarse los soportes para las curvas de la figura 18.

Figura 18. Curva de duración de caudales comparada. Históricos registrados, caudales simulados.



Del juego de curvas anteriores se observa que con los resultados del modelo SARIMAX (14,0,13) Temperatura, se sobre estima la producción de la cuenca para los caudales más bajos, mientras que se subestiman los caudales mayores en la misma y ante los escenarios de restricción por caudal de servidumbre o ambiental, los caudales exigidos serían mayores que los resultantes de los datos históricos, por lo que el valor de caudal aprovechable se reduciría, limitando la viabilidad de la PCH por el incremento del caudal de servidumbre, restringiendo la producción. Este resultado muestra las consecuencias negativas que se tendrían, sobre la generación de energía, de no existir la variación extrema en diferentes períodos; mientras que los períodos considerados como El Niño históricos representan los más bajos caudales y las curvas para la serie histórica y simulada y sus respectivos períodos Neutros, prácticamente coinciden. En la tabla 16 se muestran los valores de caudal medio mensual multianual para los escenarios de variabilidad para la corriente El Cofre en la estación Totoró y su variación porcentual respecto del valor medio anual multianual.

Tabla 14. *Relación de Caudales Medios Mensuales Multianuales para escenarios de variabilidad históricos y simulados. El Cofre*

ESCENARIO	CAUDAL MEDIO MENSUAL MULTIANUAL (m ³ /s)	VARIACIÓN RESPECTO DEL MEDIO HISTÓRICO MULTIANUAL %	ESCENARIO	CAUDAL MEDIO MENSUAL MULTIANUAL (m ³ /s)	VARIACIÓN RESPECTO DEL MEDIO HISTÓRICO MULTIANUAL %
HISTÓRICO	1.208	0	SIMULADO	1.125	-6.914
LA NIÑA HISTÓRICO	1.3744	13.739	LA NIÑA SIMULADOS	1.145	-5.234
EL NIÑO HISTÓRICO	1.1	-8.969	EL NIÑO SIMULADOS	1.101	-8.862

Nota: los valores muestran el efecto de la suavización de la variabilidad sobre los caudales en la fuente El Cofre para los escenarios simulados, en donde el QMMM para los períodos La Niña, que son más frecuentes y más intensos por producción de caudal, disminuye considerablemente, generando el aplanamiento evidente de la CDC para el escenario simulado.

La viabilidad de una PCH está determinada por la capacidad de la fuente para soportar la producción de energía que se compone de energía firme, aquella que logra producirse cuando los caudales en la fuente son superiores al QMMM y secundaria que es aquella lograda para valores de caudal menores que el medio multianual. Teniendo esto presente, y con la consideración del caudal ambiental que limita el caudal aprovechable, se decidió analizar la producción de energía y potencia en la planta a partir de los escenarios no extremos para los caudales de mayor permanencia en la fuente. En este rango están los obtenidos para los períodos La Niña históricos; los períodos de variabilidad natural representados en la CDC para la serie histórica registrada, y el resultado de la serie simulada correspondiente a un escenario de NO VARIABILIDAD. Si bien los registros más bajos se verifican para los períodos históricos de fenómeno El Niño, estos han sido los menos y de menores intensidades por lo que puede generarse un sesgo al momento de considerar la producción de energía por los menores caudales registrados. Así que se está abarcando un rango aceptable de variabilidad para la producción. A partir de estos escenarios se construyeron las curvas de energía, potencia y factor de planta que permitieron determinar la generación teniendo en cuenta la recomendación del ENA 2022 sobre el caudal ambiental, que corresponde al de los percentiles 85% o 75% en la CDC, en función del Índice de Regulación Hídrica de la cuenca. Condiciones mostradas en la Tabla 17 como los sub-escenarios 1 y 2, pues para cada escenario de variabilidad se analizarán las restricciones provocadas por estas dos condiciones. En resumen, la tabla 15 presenta los escenarios de variabilidad considerados para el análisis y desarrollo de la metodología propuesta en el presente trabajo, con las limitantes para caudal aprovechable determinados por el ENA 2022, y en la tabla 16 se relacionan los caudales medio mensual multianual, los caudales ambientales obtenidos de las correspondientes CDC y los aprovechables para cada uno de los escenarios y condiciones de restricción por caudal ambiental.

Tabla 15. Escenarios de variabilidad

<i>Escenarios de Variabilidad Climática para los Caudales de la Fuente Rio El Cofre.</i>						
Escenario	Índice considerado	Condición de Variabilidad	Período analizado	Serie de caudal	Caudales de Servidumbre	
ESCENARIO HISTÓRICO EO	-----	Serie histórica	1961-2020	QMM	1. 85%	2. 75%
ESCENARIO LA NIÑA HISTÓRICO EOH	ONI	Períodos La Niña	1961-2020	QMM	1. 85%	2. 75%
ESCENARIO SIMULADO ESA	MODELO ARIMA	No Variabilidad	1961-2020	QMM	1. 85%	2. 75%

Tabla 16. Caudal aprovechable para cada escenario de variabilidad

ESCENARIO	QMMM (m ³ /s)	CAUDALES DE SERVIDUMBRE (m ³ /s)		CAUDAL APROVECHABLE (m ³ /s)	
		85% (1)	75% (2)	85% (1)	75% (2)
EO	1.208	0.68	0.79	0.528	0.418
EOH	1.379	0.76	0.91	0.619	0.469
ESA	1.125	0.83	0.90	0.293	0.229

En el apartado 7.1 se planteó usar los métodos que priorizan la generación y aquellos que tienden a mantener la estabilidad ecológica del cauce, además de los indicados en el ENA 2022 como limitantes para el caudal aprovechable. Los que priorizan la generación corresponden a los caudales para los percentiles 95% y 90% en la CDC y los que tienden a mantener la estabilidad de las condiciones ecológicas se presentan en la ecuación 9.

$$Qe_{14} = 5\%QMA + 10\%Qmd; \quad Qe_{15} = 20\%Qmd \quad (9)$$

Donde

QMA corresponde al caudal medio anual y Qmd es el caudal medio diario.

Para la condición histórica en la fuente El Cofre estos valores son: QMA = 1.214 m³/s, y Qmd = 1.208 m³/s y los resultados para los caudales de servidumbre:

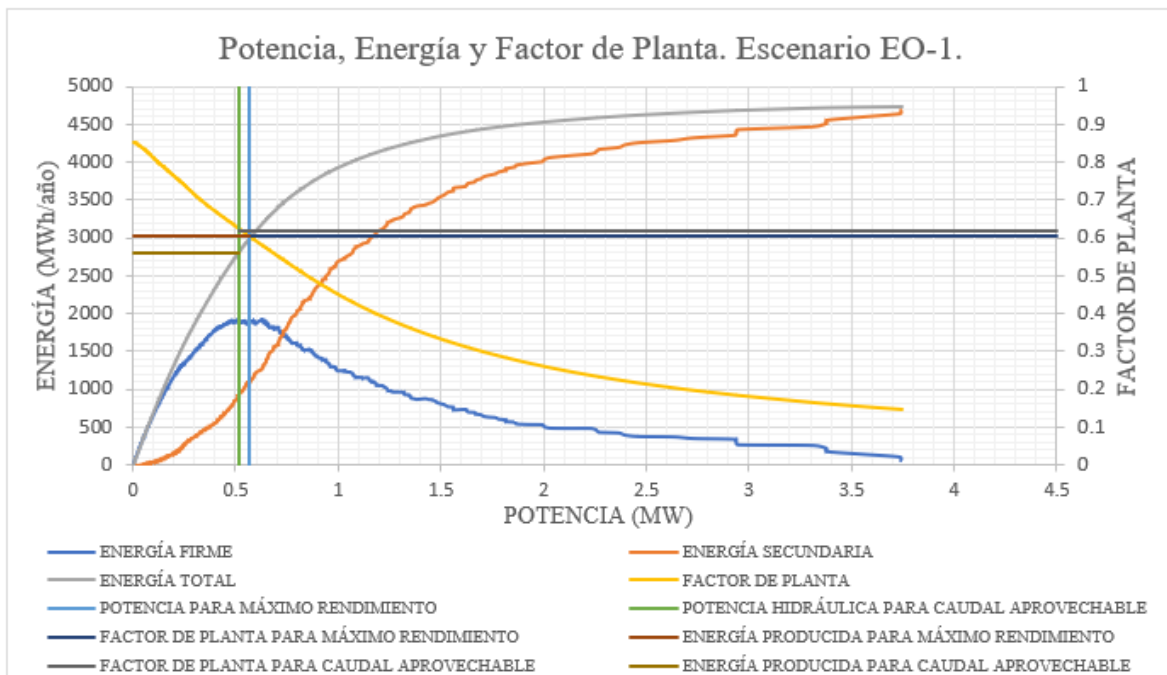
$$Qe_{14} = 0.1815 \frac{m^3}{s}; \quad Qe_{15} = 0.2416 \frac{m^3}{s}$$

Valores que junto con los que priorizan la generación, son menores que aquellos considerados por otros métodos, incluso menores que aquel mínimo definido por la norma colombiana como caudal de servidumbre según las condiciones de conservación de la cuenca, así que no se tuvieron en cuenta como caudales aprovechables que pudieran restringir la producción de energía y determinación de la potencia.

7.6 Potencia, energía y factor de planta

El caudal aprovechable en una central hidroeléctrica determina la energía producida para una cierta potencia instalada en la central. Frente a las condiciones de variabilidad climática estudiadas, que condicionan el caudal aprovechable, se ha hecho la determinación de la energía producida y el factor de planta. Las figuras 19, 20 y 21 muestran los resultados obtenidos para los escenarios de variabilidad Histórico (EO), La Niña (EOH) y el simulado con el modelo SARIMAX (ESA), teniendo en cuenta las condiciones de restricción para determinar el caudal aprovechable definidas por el ENA 2022 (75% y 85% CDC). Las tablas que soportan los resultados están consignadas en el Anexo 7. De las gráficas se han obtenido los valores representativos de energía, factor de planta y potencia que se lograría para el caso real del uso del caudal aprovechable y aquellos valores para la condición de máximo rendimiento, que es aquella que permite la máxima generación con el mayor factor de planta posible para las condiciones propias del desarrollo. En las tablas 19, 20 y 21 se resumen los resultados obtenidos por cada escenario y en las figuras 22 y 23 se presenta el compilado por máximo rendimiento y potencia hidráulica, que es la que realmente podría lograrse.

Figura 19. Potencia, energía y factor de planta para los escenarios históricos de variabilidad EO.



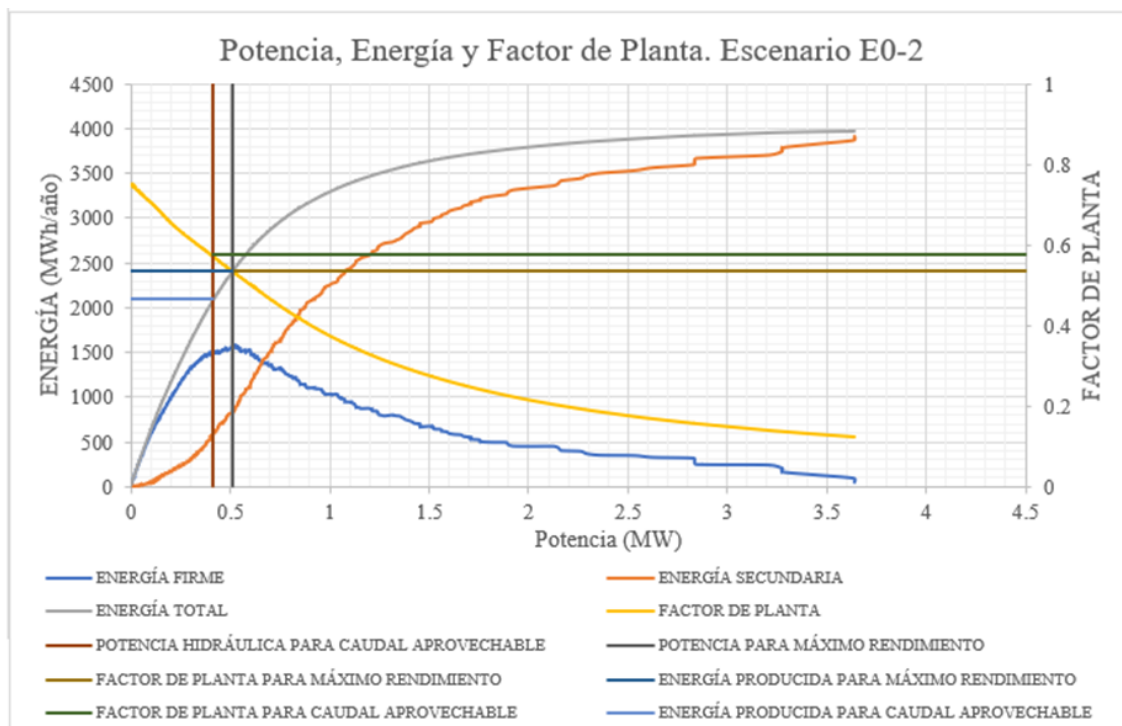


Tabla 17. Valores de energía, potencia y factor de planta para escenarios históricos EO-1 y EO-2

ESCENARIO EO-1	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	0.57	0.518
FACTOR DE PLANTA	0.605	0.562
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	3010	2800
ESCENARIO EO-2	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	0.515	0.41
FACTOR DE PLANTA	0.535	0.575
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	2400	2100

Figura 20. Potencia, energía y factor de planta para el escenario de variabilidad La Niña, EOH.

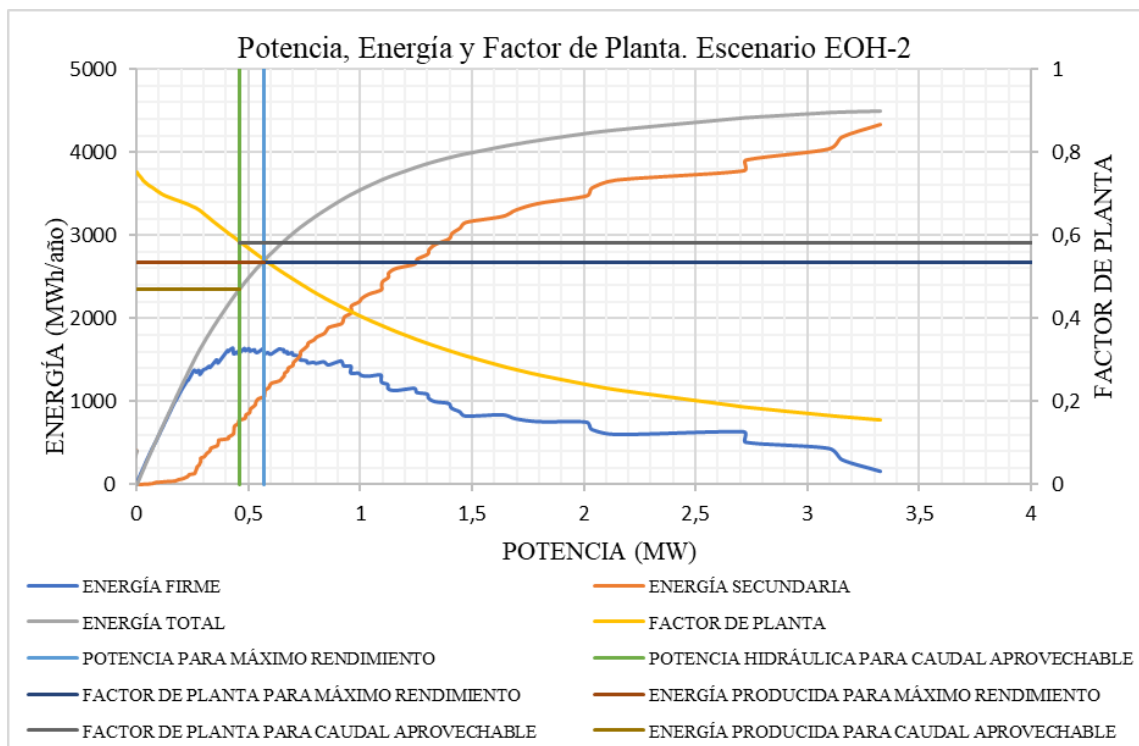
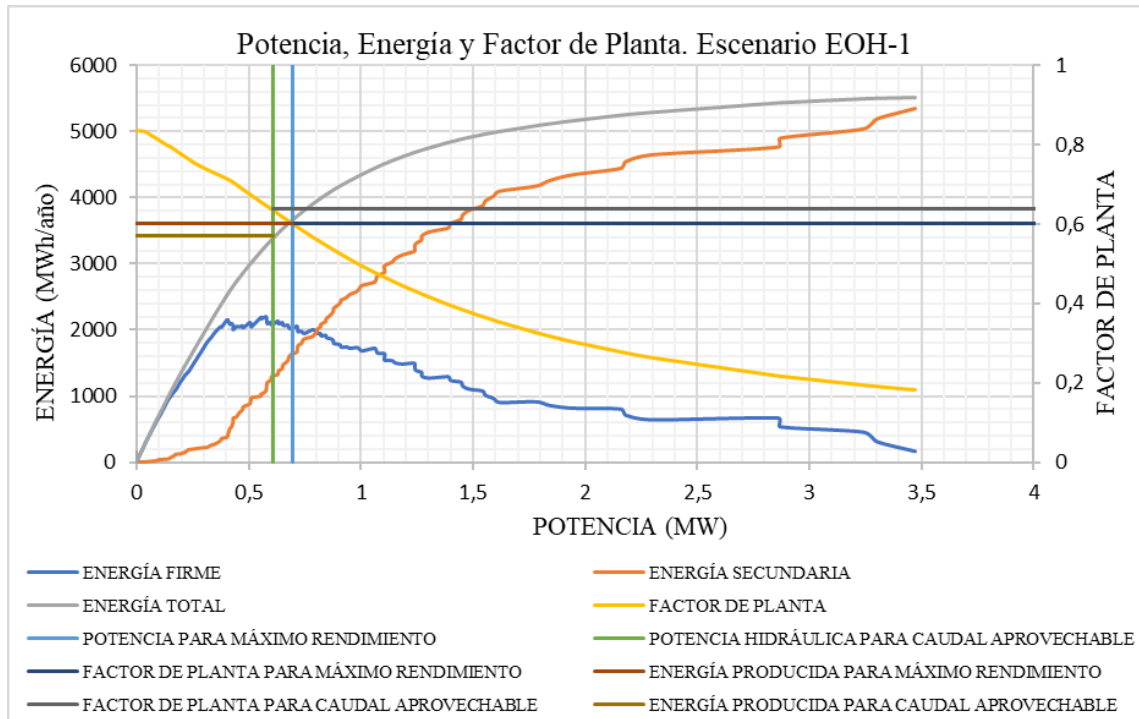
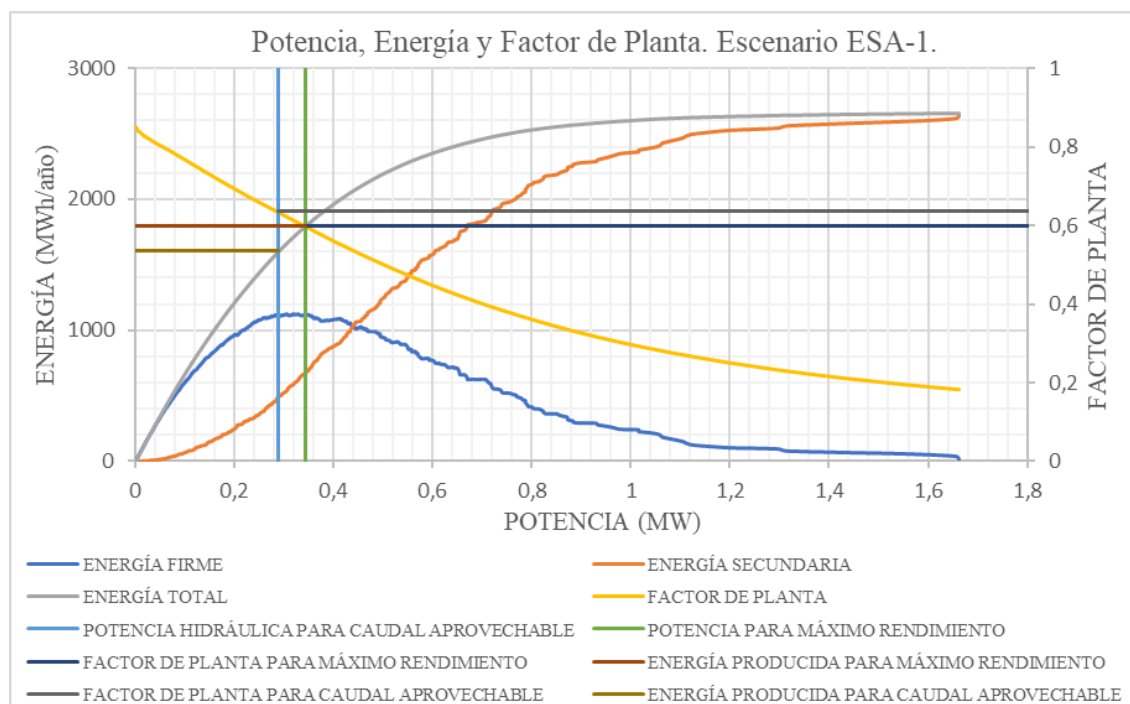


Tabla 18. Valores de energía, potencia y factor de planta para los escenarios La Niña: EOH-1, EOH-2

ESCENARIO EOH-1	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	0.695	0.607
FACTOR DE PLANTA	0.6	0.64
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	3600	3400

ESCENARIO EOH-2	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	0.567	0.46
FACTOR DE PLANTA	0.535	0.582
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	2680	2350

Figura 21. Potencia, energía y factor de planta para escenarios simulados. ESA.



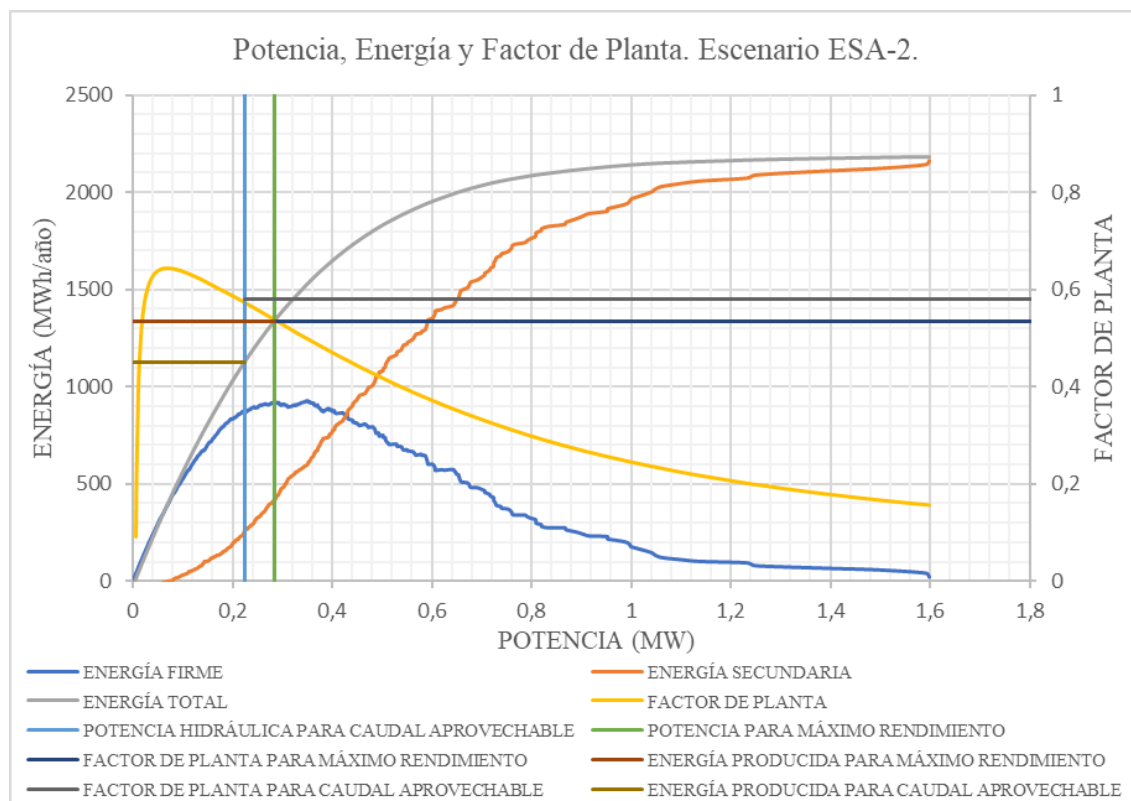


Tabla 19. Valores de energía, potencia y factor de planta para escenarios simulados. ESA-1 y ESA-2.

ESCENARIO ESA-1	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	0.343	0.287
FACTOR DE PLANTA	0.6	0.635
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	1800	1600
ESCENARIO ESA-2	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	0.284	0.224
FACTOR DE PLANTA	0.535	0.58
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	1330	1120

Figura 22. Energía potencia y factor de planta para máximo rendimiento. Sub escenarios 1 y 2 de restricción de caudal.

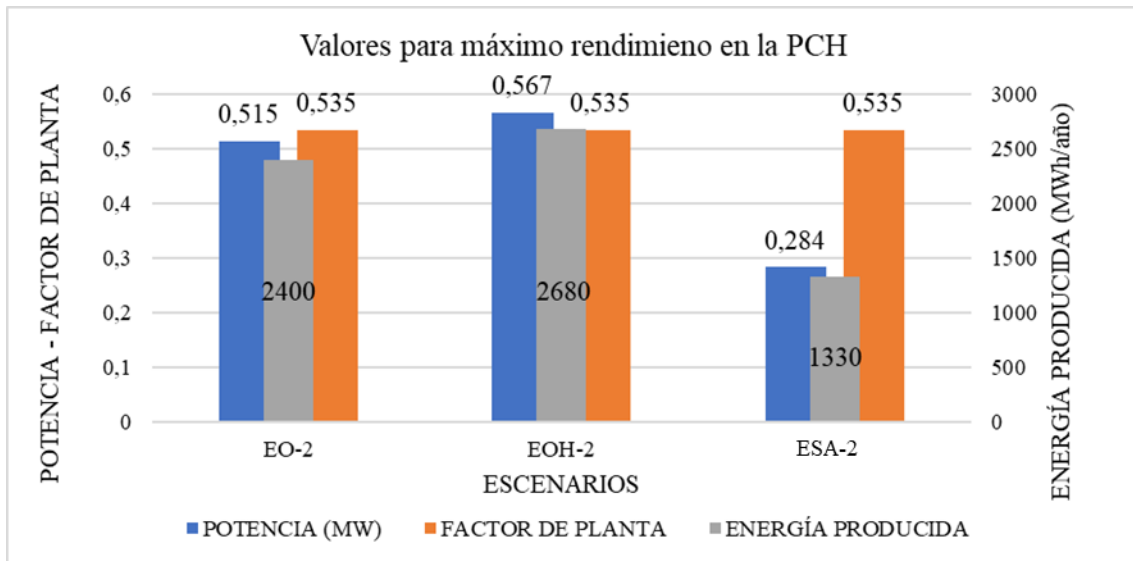
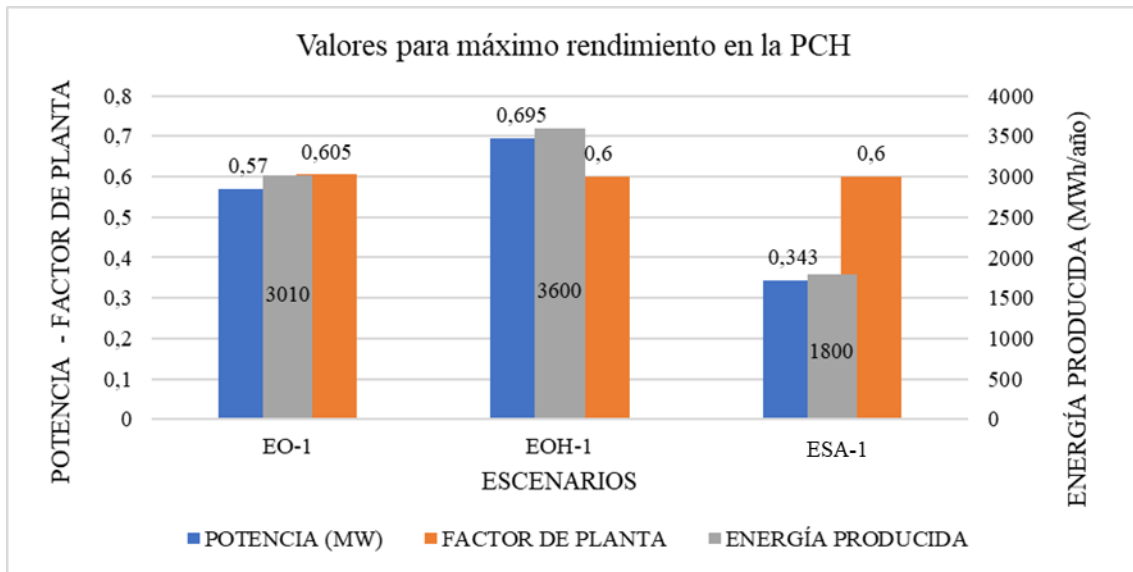
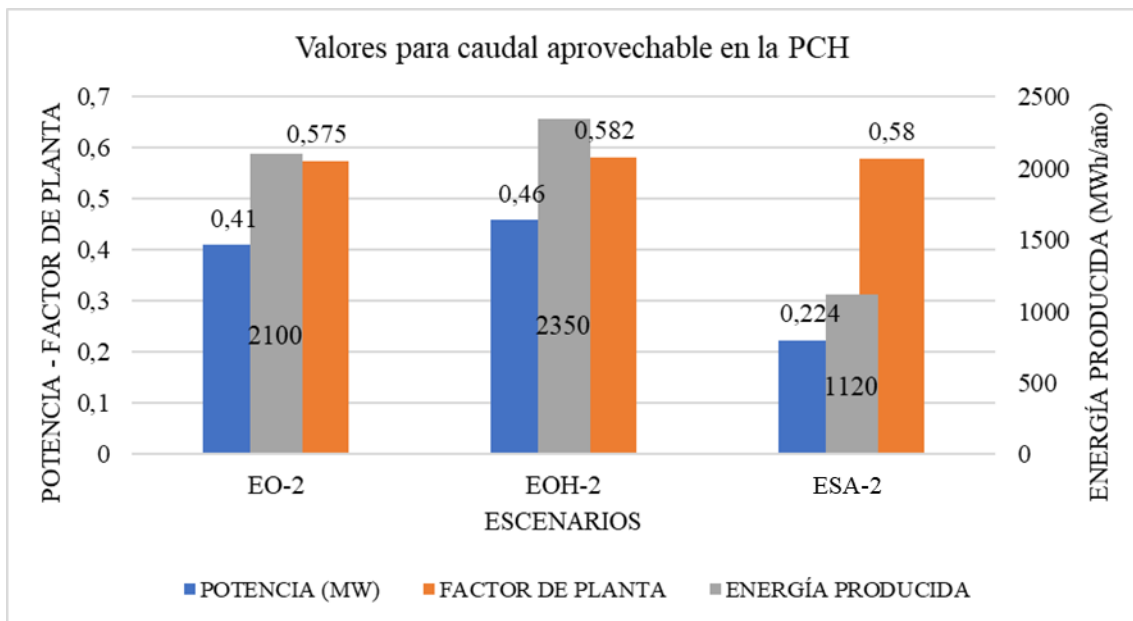
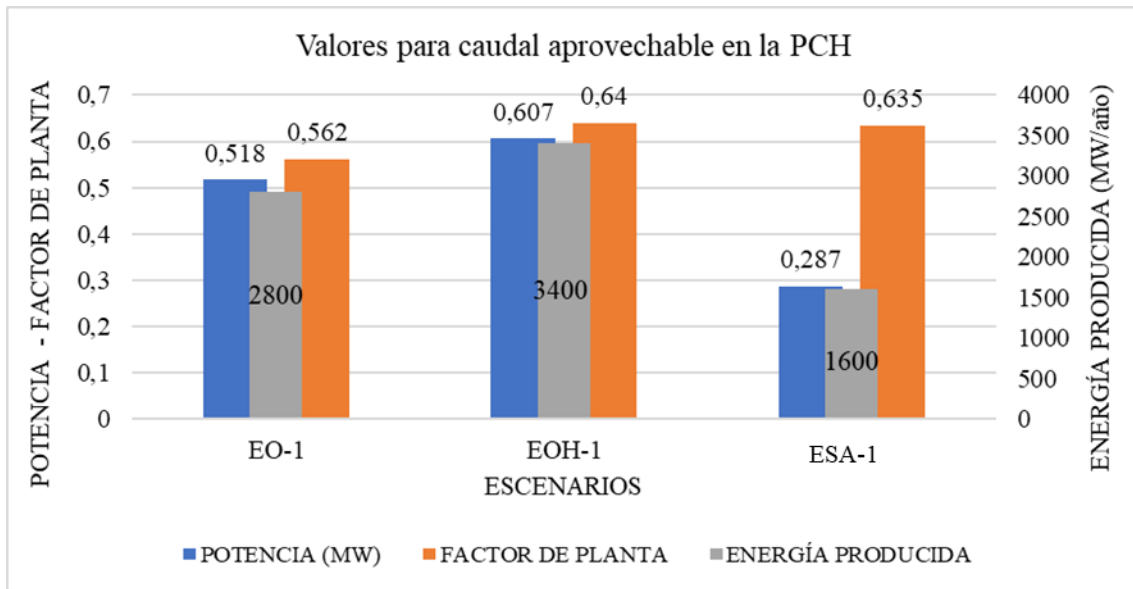


Figura 23. Energía potencia y factor de planta para potencia hidráulica. Sub escenarios 1 y 2 de restricción de caudal.



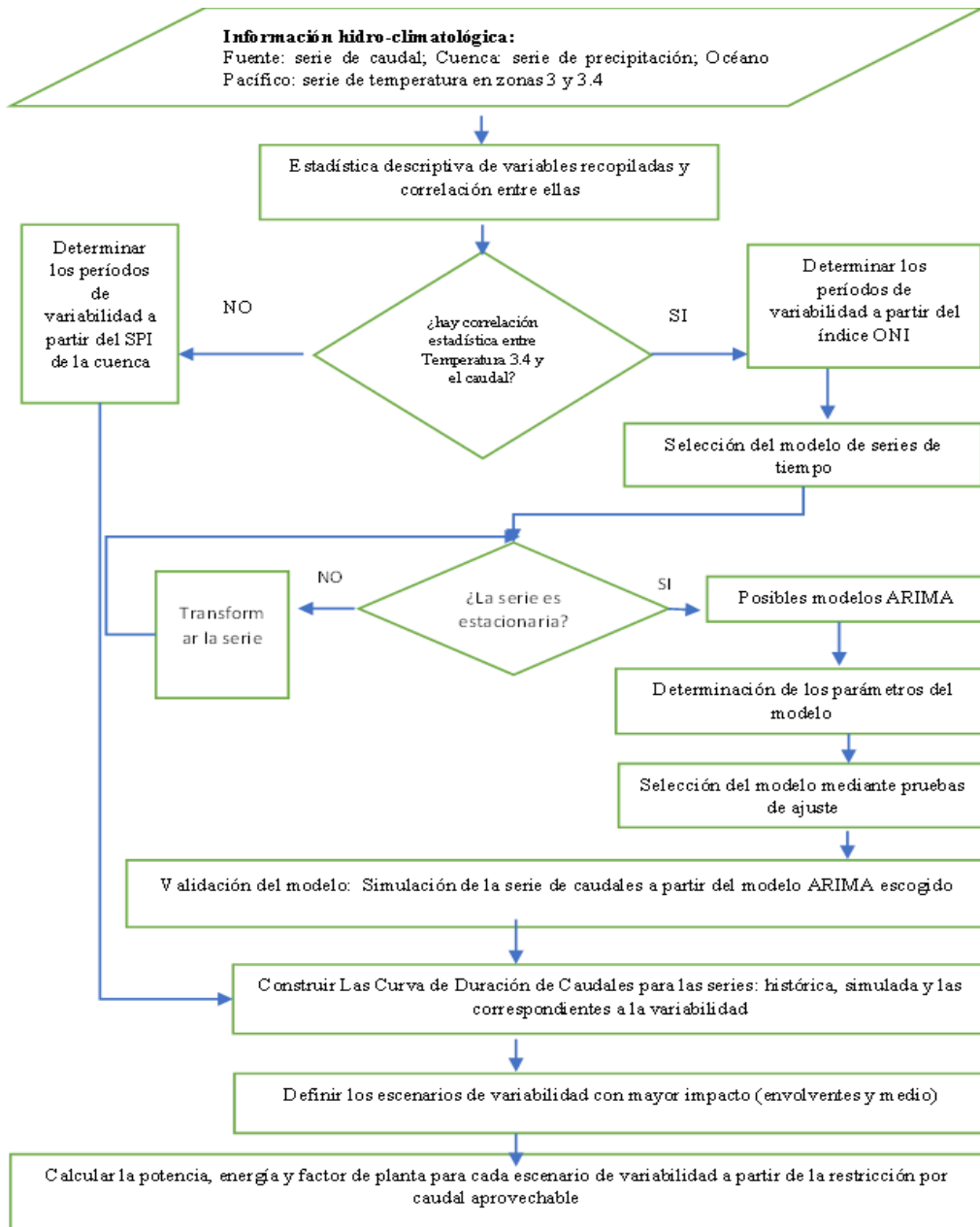
Es evidente que la variabilidad climática mejora las condiciones de generación de energía por incremento de la potencia, para el factor de planta más alto posible. Es también claro que la condición más favorable para la generación de energía hidroeléctrica es el período de variabilidad La Niña, pues, aunque el caudal medio en la fuente se modifica en el 14% respecto de aquel histórico, la posibilidad de generación para cualquiera de los dos caudales de servidumbre se incrementa en un porcentaje entre el 11% y el 21% respecto de la generación para el caudal medio mensual histórico registrado. García Piñeros menciona reducciones del orden del 38% sobre los caudales para la cuenca

del río Cauca en períodos El Niño e incrementos que pueden llegar a más del 60% (García et al., 2012)

7.7 Propuesta de metodología para determinar el caudal aprovechable en proyectos de PCH, bajo escenarios de variabilidad climática.

La figura 24 muestra el diagrama de flujo que representa la metodología propuesta para la determinación del caudal aprovechable en proyectos de PCH bajo escenarios de variabilidad climática y su influencia en proyectos hidroeléctricos.

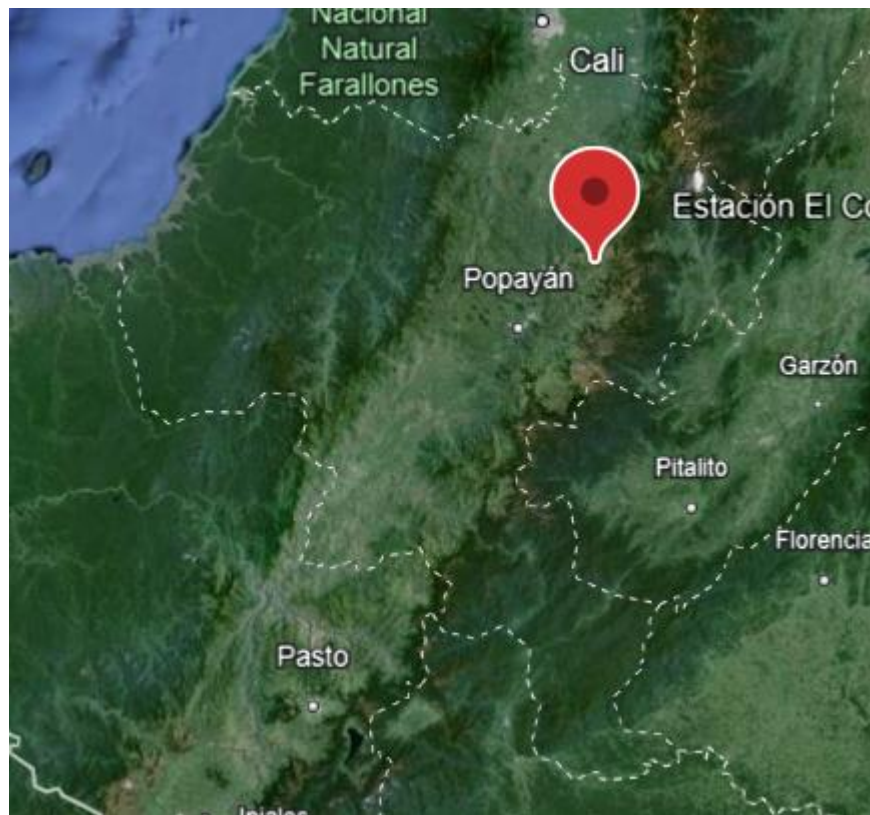
Figura 24. Metodología propuesta



7.8 Validación de la metodología. Estación El Cortijo. Silvia - Cauca

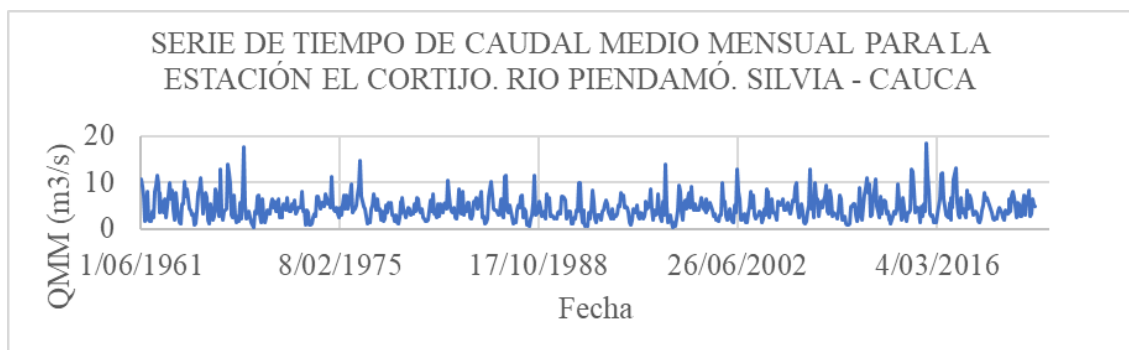
La validación de la metodología propuesta se hizo con la información de la estación limnimétrica convencional El Cortijo ubicada sobre el río Piendamó en el municipio de Silvia, Cauca, en la Zona Andina colombiana como se observa en la figura 25, y que se identifica en el IDEAM con el código 26027090. Esta estación cuenta con registros de caudal desde el mes de junio de 1961 representados en la figura 26, de la que puede verse que la serie es estacionaria y que los registros oscilan alrededor del valor de caudal medio mensual multianual. La serie de datos de caudal medio mensual y la estadística descriptiva de la misma pueden revisarse en el Anexo 8 (documento anexo). Del análisis descriptivo se obtuvo que el valor de caudal medio mensual multianual ha sido de $4.58 \text{ m}^3/\text{s}$, que $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ ha sido el mínimo caudal medio mensual registrado y el mayor caudal registrado de $18.36 \text{ m}^3/\text{s}$. Se hizo además la caracterización a partir del histograma de frecuencia y la determinación de los valores atípicos de caudal representados en el diagrama de cajas y bigotes para cada uno de los meses, detectando que la distribución no es normal y que, si bien se presentan valores de caudal estadísticamente fuera de rango, son posibles desde el punto de vista hidrológico, por lo que no se descartaron para el análisis objeto de este estudio (Anexo 8).

Figura 25. Ubicación de la estación limnimétrica EL Cortijo. Silvia Cauca



Tomado de Google Earth. (26/05/2024)

Figura 26. Serie histórica de caudales medios mensuales en la estación El Cortijo. Código 26027090



Para seguir la metodología propuesta el caudal aprovechable será determinado con base en los caudales de servidumbre correspondientes a los del percentil 75% y 85% en la CDC y a partir de la información conocida de que la zona Andina Colombiana está afectada en su hidrología por la temperatura del Océano Pacífico Ecuatorial, se hizo el análisis de correlación estadístico entre las temperaturas en la zona 3.4 del océano y los caudales en la fuente, pues la cuenca se encuentra ubicada en la zona Andina. En la tabla 20 se consignan los resultados obtenidos de los coeficientes de correlación estadística de Spearman y Tau-b de Kendall, donde es evidente que existe relación significativa, aunque de baja intensidad, entre los caudales de la fuente y la temperatura media del Océano Pacífico, de modo que puede usarse el índice ONI para detectar períodos de variabilidad climática en la fuente estudiada, además de permitir la construcción de un modelo ARIMA, estacional o no, con una variable exógena explicativa de los valores de caudal en la fuente. En la figura 27 se muestra el correlograma de la serie de caudales en logaritmos para la estación El Cortijo, a partir del cual se definieron posibles modelos ARIMA, SARIMA y SARIMAX para explicar los caudales históricos registrados.

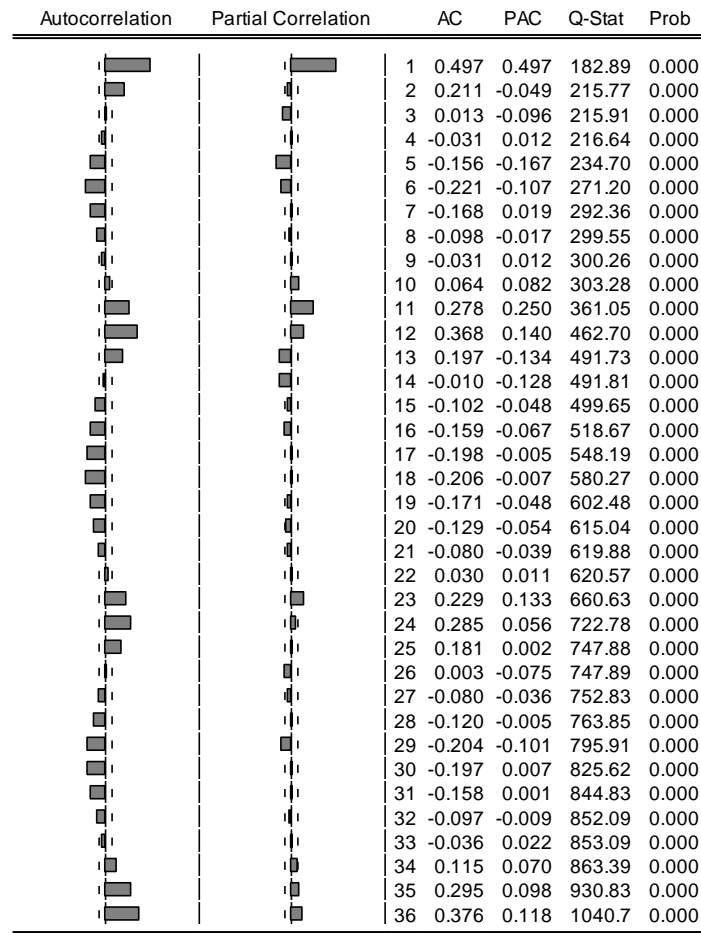
Tabla 20. Correlaciones. Temperatura del océano Pacífico y caudal en la estación El Cortijo. Silvia Cauca.

			El Cortijo	Tempzona3.4 Pac	Tempzona3P ac
Tau_b de Kendall	El Cortijo	Coeficiente de correlación	1.000	-,064**	-,136**
		Sig. (bilateral)		0.010	0.000
		N	736	736	736
Rho de Spearman	El Cortijo	Coeficiente de correlación	1.000	-,093*	-,204**
		Sig. (bilateral)		0.011	0.000
		N	736	736	736

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Figura 27. Correlograma para la serie de Caudales Medios Mensuales en la Estación El Cortijo, Municipio de Silvia-Cauca



El correlograma anterior muestra la presencia de un componente autorregresivo y uno de media móvil aparentemente estacional. De todos los modelos analizados el que mejores estadísticos produjo fue un SARIMAX (14,0,12) del que se muestran los resultados en la tabla 21. El modelo se generó a partir de la temperatura del Océano en la zona 3.4, que si bien, había arrojado los menores valores de correlación estadística significativa, fue la que mayor influencia tuvo al momento de explicar los caudales en la fuente de la Estación El Cortijo, esto soportado en los valores de estadísticos de evaluación de la calidad del modelo para representar los valores de caudal en la fuente(Ghimire, 2017; Zafra-Mejía et al., 2024).

Tabla 21. Estadísticos para el modelo SARIMAX (14,0,12) temperatura zona 3.4 del Océano Pacífico.

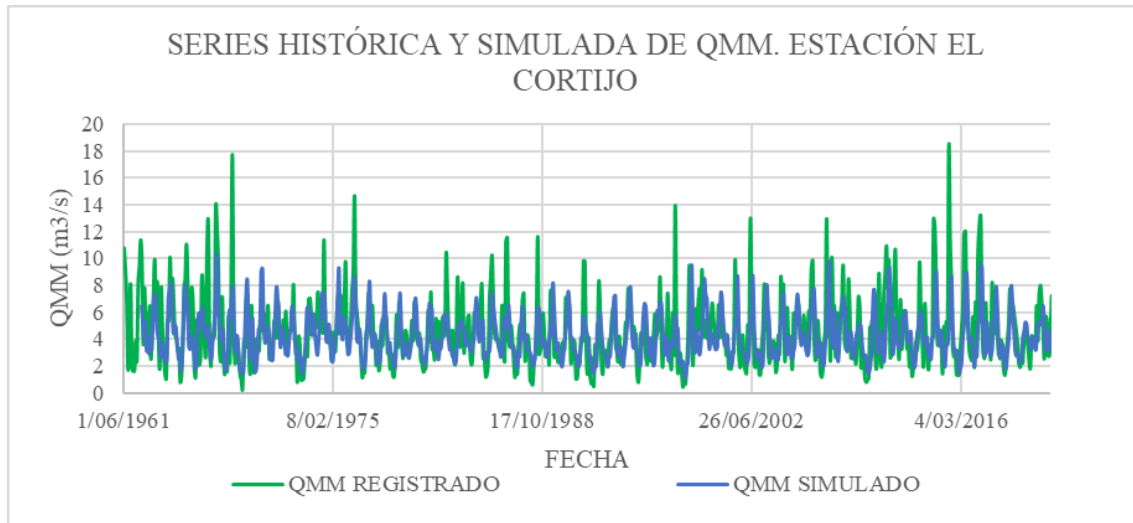
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	4.920450	0.759036	6.482498	0.0000
TEMPOPZ34	-0.132206	0.028088	-4.706832	0.0000
AR(1)	0.444855	0.040637	10.94711	0.0000
AR(11)	0.019515	0.011826	1.650148	0.0993
AR(12)	0.928473	0.028040	33.11200	0.0000
AR(13)	-0.361450	0.037290	-9.693020	0.0000
AR(14)	-0.037435	0.013219	-2.831982	0.0048
MA(1)	-0.118708	0.032315	-3.673453	0.0003
MA(12)	-0.879651	0.036917	-23.82789	0.0000
SIGMASQ	0.194951	0.010327	18.87761	0.0000
R-squared	0.445938	Mean dependent var		1.363200
Adjusted R-squared	0.439069	S.D. dependent var		0.593580
S.E. of regression	0.444564	Akaike info criterion		1.245813
Sum squared resid	143.4842	Schwarz criterion		1.308330
Log likelihood	-448.4593	Hannan-Quinn criter.		1.269924
F-statistic	64.92473	Durbin-Watson stat		2.006889
Prob(F-statistic)	0.000000			

De la información anterior resulta la ecuación para el modelo SARIMAX en la estación El Cortijo.

$$\begin{aligned}
 \text{Log } Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = & 4.920450 - 0.132206 * temp_{zona\ 3.4} + 0.444805Q_{t-1} \\
 & + 0.019515Q_{t-11} + 0.928473Q_{t-12} - 0.361450Q_{t-13} \\
 & - 0.037435Q_{t-14} - 0.118708Q_{t-1} - 0.879651Q_{t-12}
 \end{aligned}
 \tag{ 10}$$

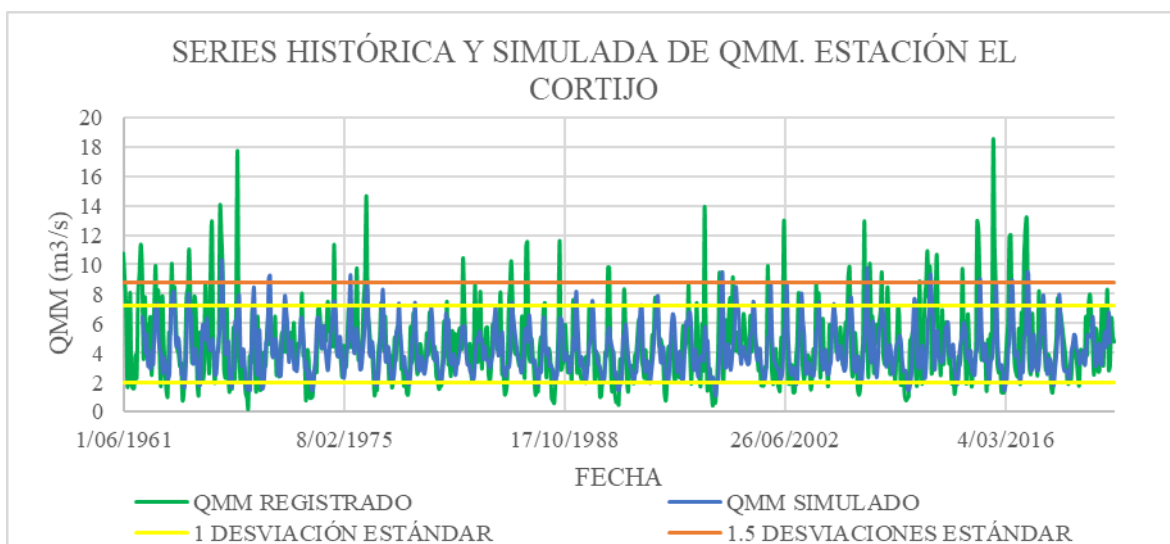
A partir de la ecuación anterior se logró la proyección de los valores de caudal para la estación El Cortijo, serie denominada simulada y que se presenta convertida en valores de caudal en la figura 28, en la que también se muestran los valores históricos registrados en la fuente. La serie de datos simulados por el modelo están consignados en el anexo 9 del documento Anexo.

Figura 28. Serie histórica y simulada de caudal en la estación El Cortijo.



En la gráfica 28 es evidente el hecho de que el modelo SARIMAX, si bien es apropiado desde el punto de vista estadístico o sea que representa los valores en la fuente, no replica los valores extremos. El mejor pronóstico para la serie será el Caudal Medio Mensual Multianual y al no reflejar los valores que pudieran ser considerados atípicos, el modelo elimina prácticamente los efectos de la variabilidad extrema natural, convirtiéndose en sí mismo es un escenario de variabilidad a tener en cuenta tal como sucedió en la estación Totoró (Sarango-Julca et al., 2020). En la gráfica de la figura 29 se muestran los límites de variación considerados no extraordinarios a partir de la desviación estándar σ . Al menos el 95% de las observaciones se encuentran contenidas en el intervalo de $(-1\sigma; 1.5\sigma)$, lo que respalda el enunciado anterior en el que se establece que el modelo elimina la variabilidad extraordinaria y que los valores más bajos de caudal presentan menos varianza.

Figura 29. Serie de Caudales y límites de variación no extraordinarios de la serie.



Las curvas de duración de caudales para la corriente del río Piendamó en la estación El Cortijo se construyeron para los escenarios de variabilidad históricos, La Niña y el correspondiente al modelo SARIMAX simulado y las mismas restricciones ambientales para el caudal aprovechable definidas para la corriente El Cofre. La figura 30 muestra las curvas de duración de caudales obtenidas, de las cuales se leyeron los valores que se presentan en la tabla 22 que permitieron determinar el caudal aprovechable para cada uno de los escenarios; las figuras 31 a 33 presentan lo correspondiente a la generación de energía, potencia y factor de planta para cada escenario; las tablas 22 a 24 contienen el resumen sobre las variables tenidas en cuenta para la generación, y las figuras 36 y 37 la comparación gráfica de los resultados obtenidos para escenarios de variabilidad y condiciones de caudal aprovechable para esta corriente.

Figura 30. Curva de Duración de Caudales para escenarios de variabilidad

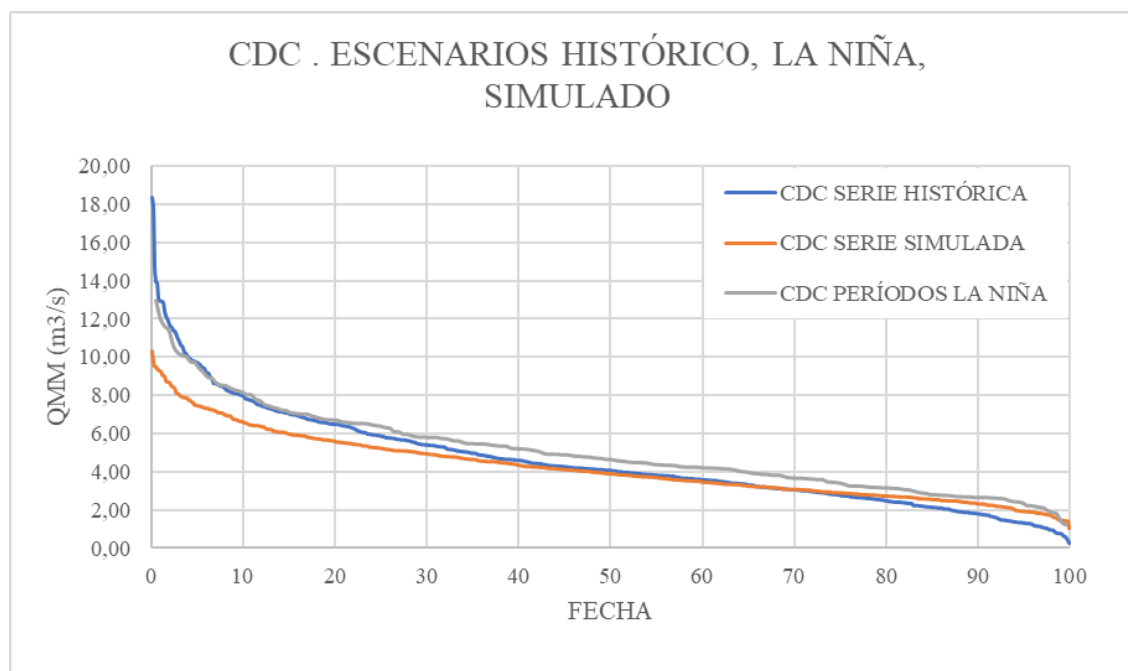


Tabla 22. Caudal aprovechable para cada escenario de variabilidad. Río Piendamó

ESCENARIO	QMMM (m ³ /s)	CAUDAL DE SERVIDUMBRE QMMM (m ³ /s)		CAUDAL APROVECHABLE (m ³ /s)	
		85% (1)	75% (2)	85% (1)	75% (2)
EO	4.588	2.16	2.75	2.428	1.838
EOH	5.027	2.8	3.4	2.227	1.627
ESA	4.221	2.58	2.9	1.641	1.321

Figura 31. Potencia, energía y factor de planta para el escenario de variabilidad histórico registrado, EO.

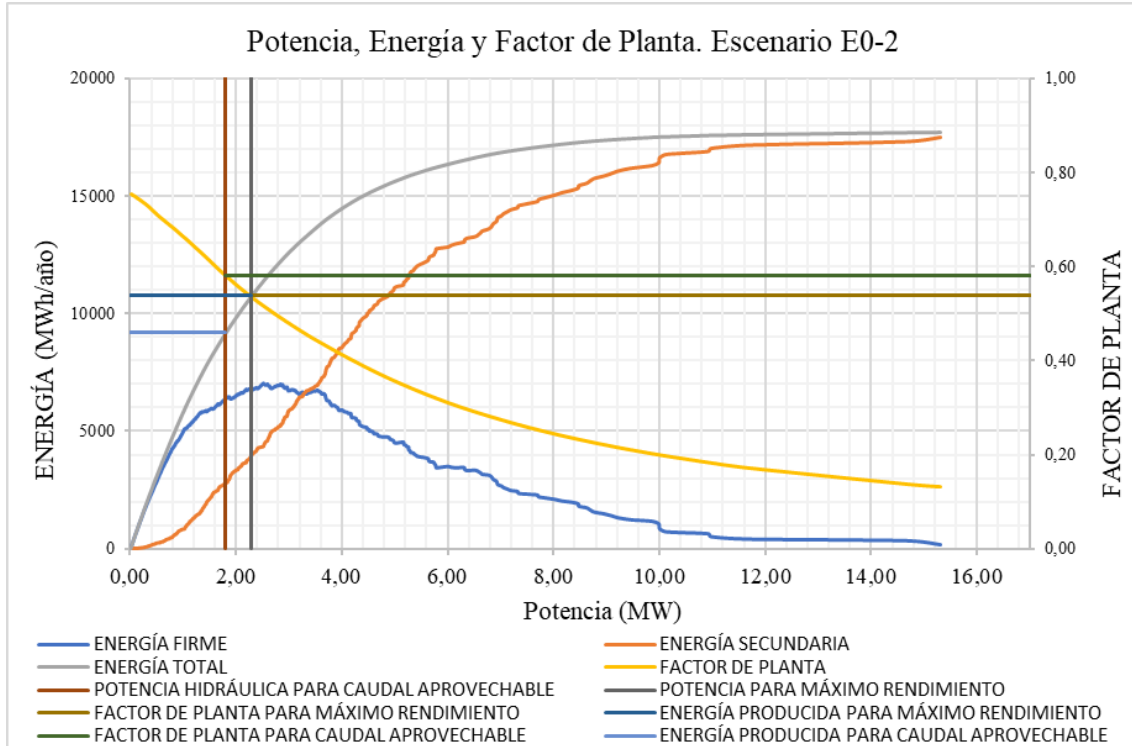
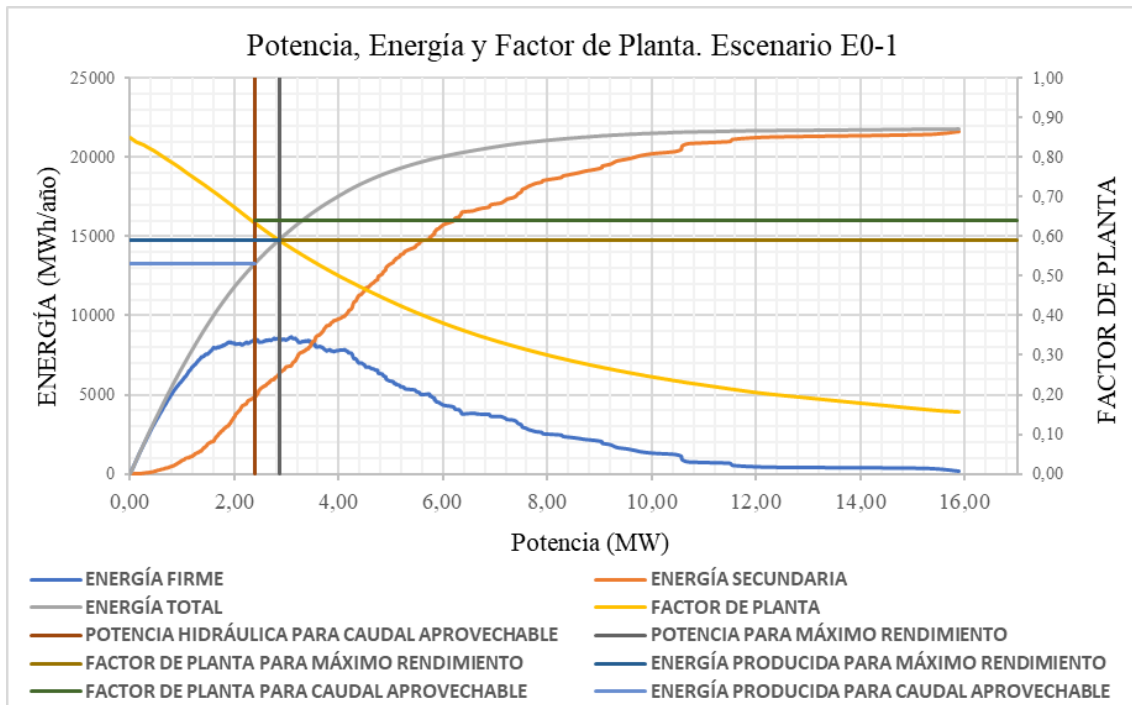


Tabla 23. *Energía, potencia y factor de planta para la serie simulada. Escenarios EO-1 y EO-2.*

ESCENARIO EO-1	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	2.87	2.382
FACTOR DE PLANTA	0.59	0.64
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	14800	13200

ESCENARIO EO-2	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	2.3	1.803
FACTOR DE PLANTA	0.538	0.58
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	10400	8600

Figura 32. Potencia, energía y factor de planta para los escenarios de variabilidad La Niña. EOH.

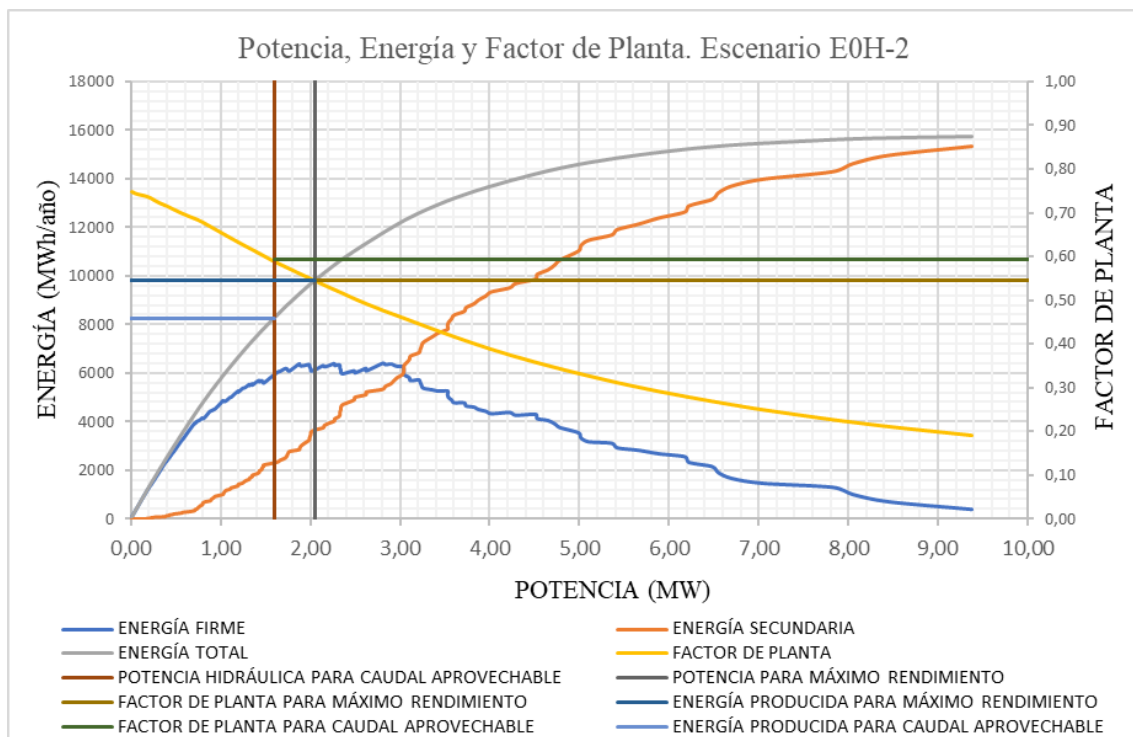
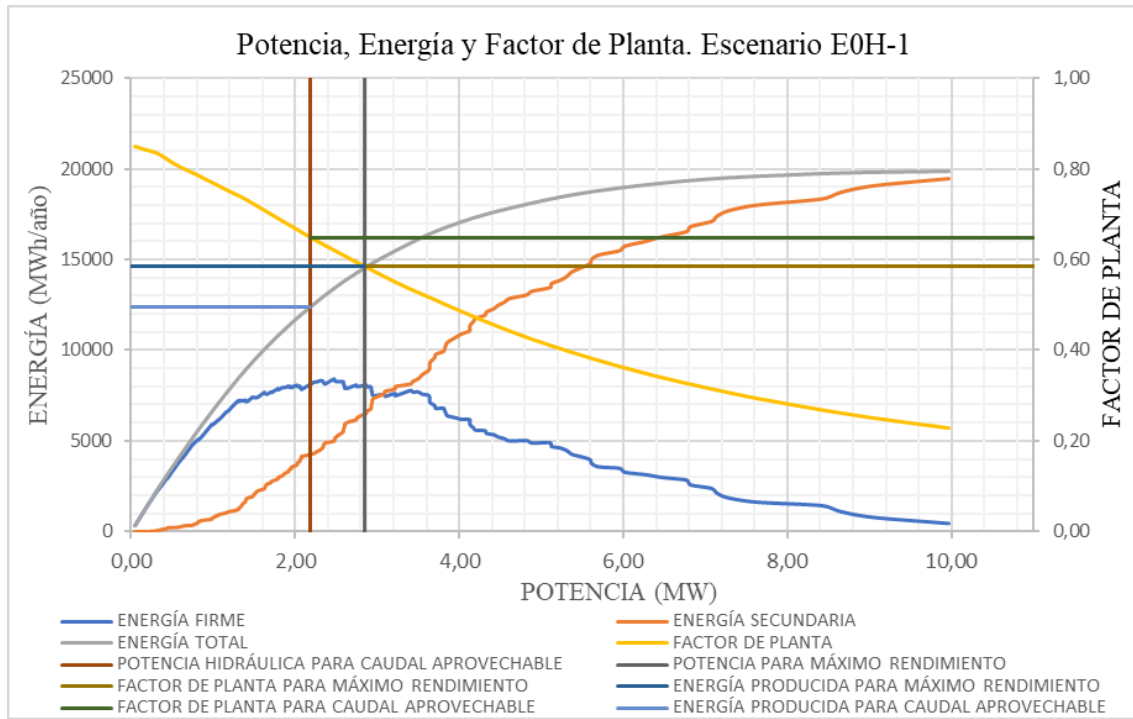


Tabla 24. Valores de energía, potencia y factor de planta para la serie La Niña. Escenarios EOH1 EOH2

ESCENARIO EOH-1	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	2.85	2.184
FACTOR DE PLANTA	0.584	0.648
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	14700	12300

ESCENARIO EOH-2	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	2.05	1.596
FACTOR DE PLANTA	0.545	0.592
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	9800	8390

Figura 33 Potencia, energía y factor de planta para los escenarios Simulado. ESA

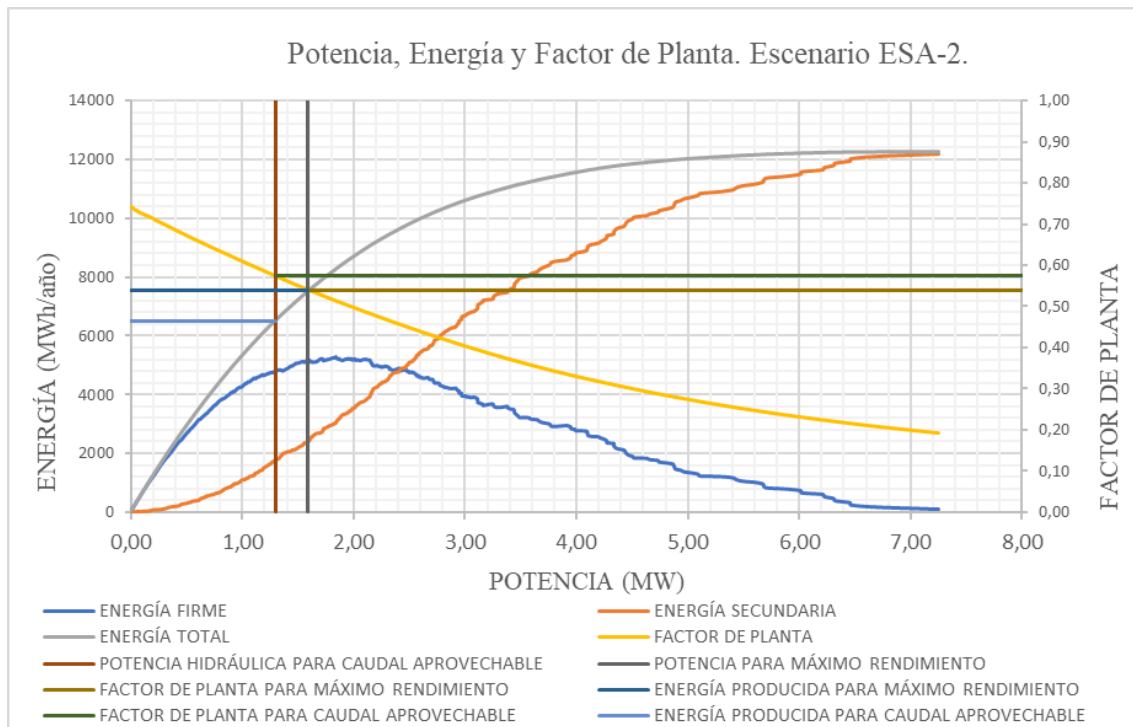
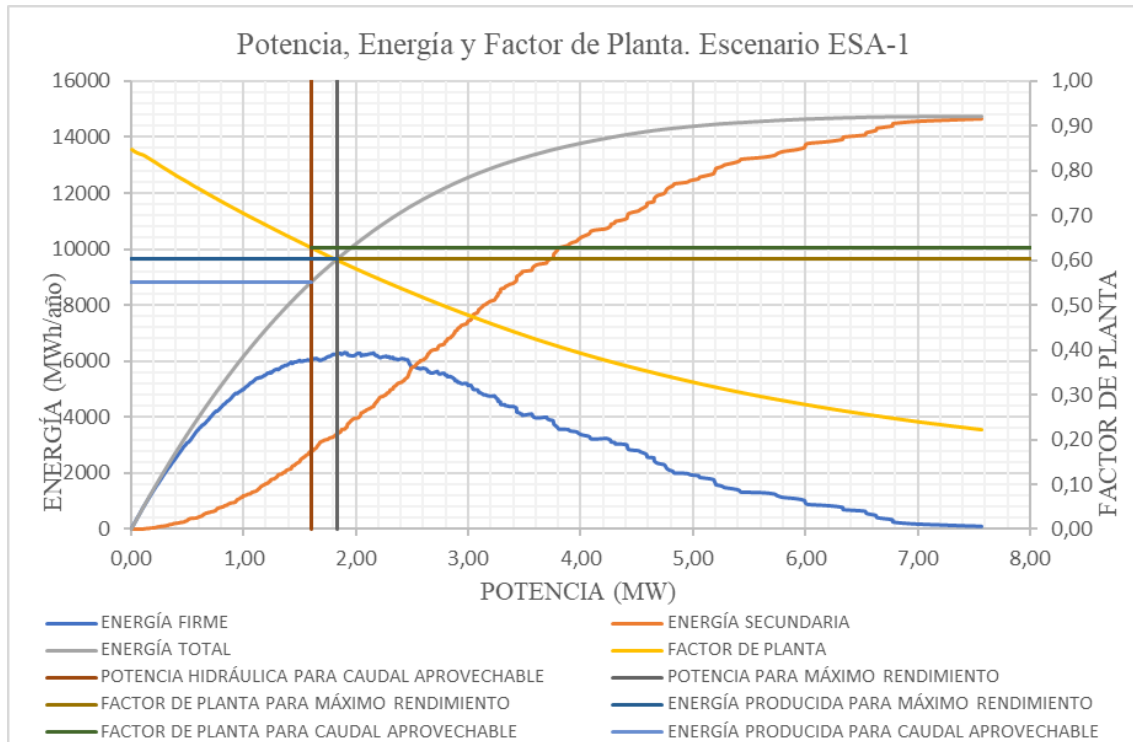


Tabla 25. Valores de energía, potencia y factor de planta para la serie simulada. Escenarios ESA-1 y ESA-2.

ESCENARIO ESA-1	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	1.83	1.61
FACTOR DE PLANTA	0.603	0.628
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	9600	8800

ESCENARIO ESA-2	MÁXIMO RENDIMIENTO	CAUDAL APROVECHABLE
POTENCIA (MW)	1.59	1.296
FACTOR DE PLANTA	0.54	0.575
ENERGÍA PRODUCIDA (MWh/año)	7600	6500

Los resultados anteriores se presentan gráficamente en las figuras 34 y 35, en las que se plasman, para cada condición de caudal aprovechable, los resultados de energía, potencia y factor de planta correspondientes a cada uno de los escenarios de variabilidad.

Figura 34. Gráficos comparativos para los escenarios de variabilidad y potencia para máximo rendimiento. Río Piendamó

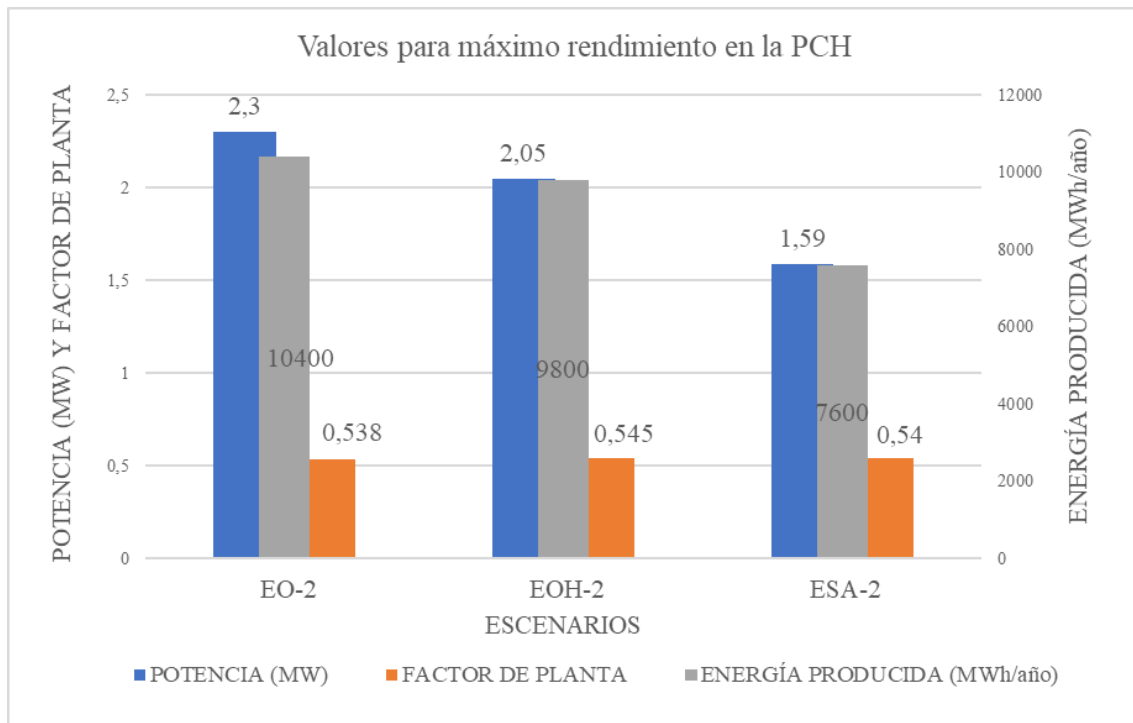
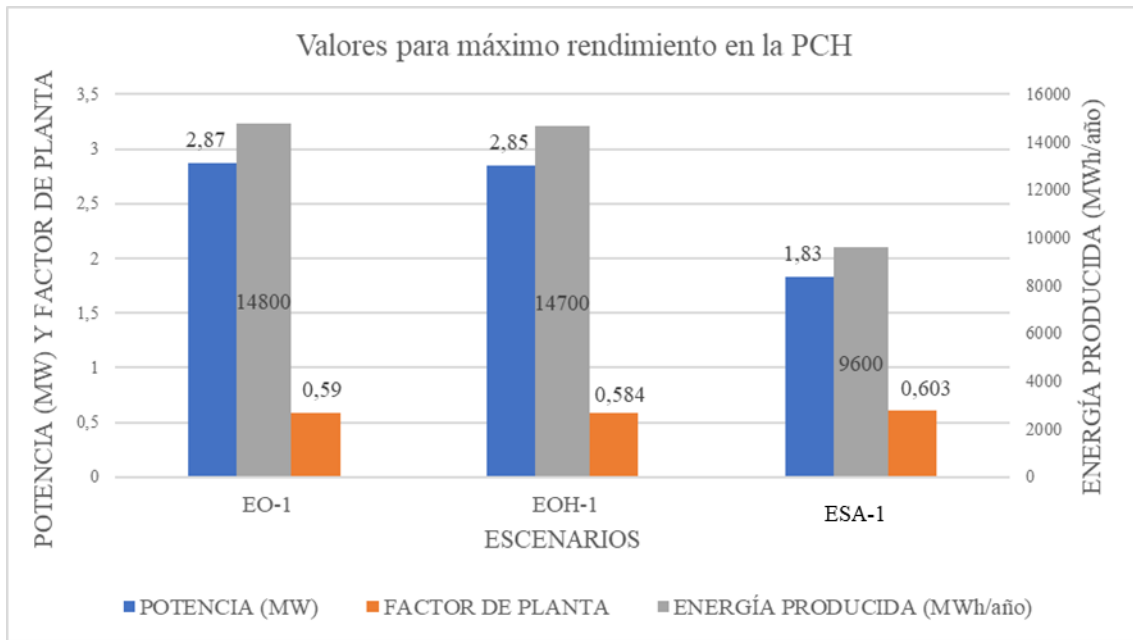
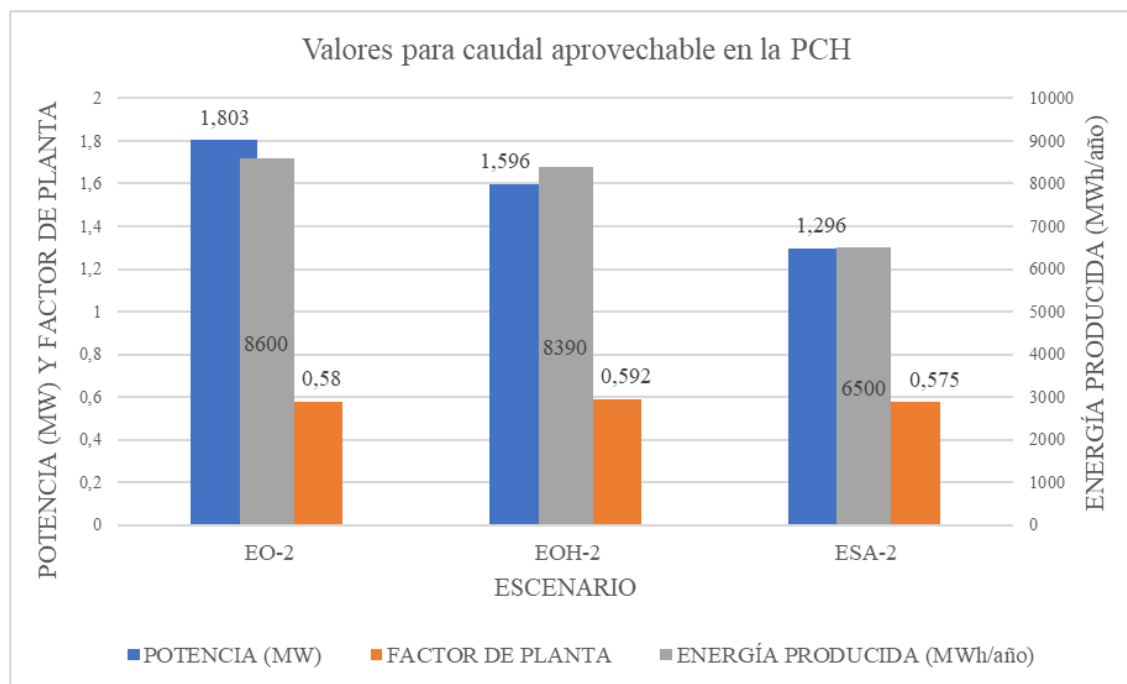
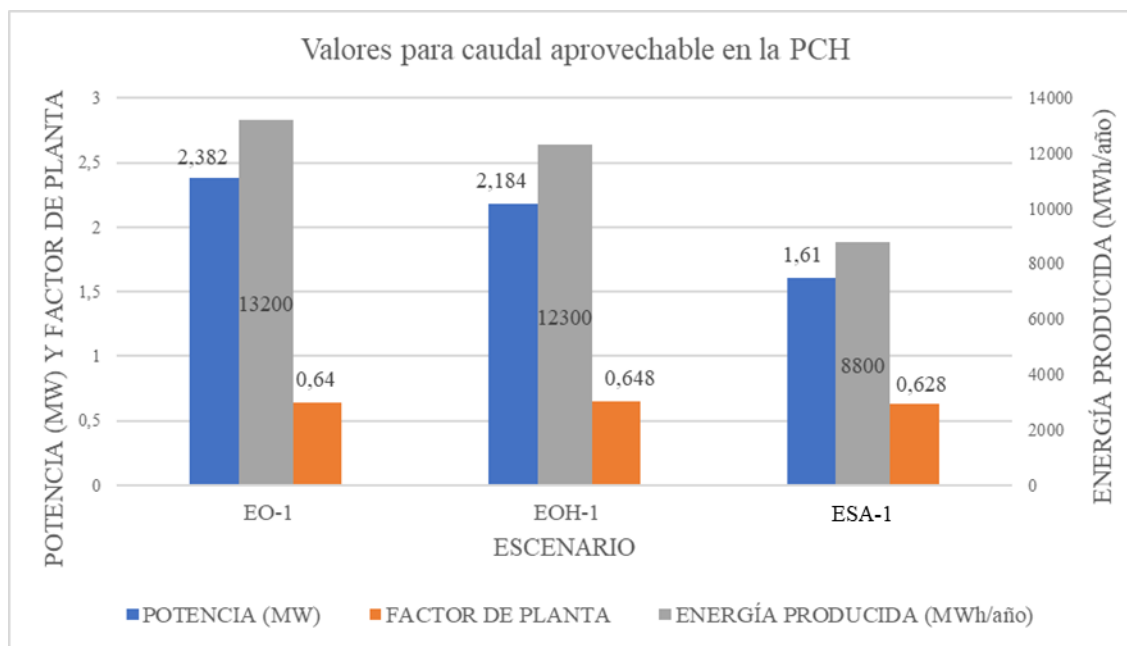


Figura 35. Gráficos comparativos para los escenarios de variabilidad y potencia para caudal aprovechable. Río Piendamó



Los resultados anteriores evidencian diferencias en la generación hidroeléctrica bajo escenarios de variabilidad climática. Al analizar el proceso de generación, en un escenario simulado de **no variabilidad**, se observa que la producción de energía se ve altamente afectada en comparación con el escenario histórico **EO**. Esto demuestra que la variabilidad extrema es crucial para el desarrollo hidroeléctrico.

Por otro lado, las gráficas muestran que, a mayores caudales en la fuente, el factor de planta se modifica aunque muy poco, estando en general alrededor de 0.6, aceptable según la UPME. Aun así, un desarrollo puede considerarse factible ya que la energía generada durante el tiempo de funcionamiento compensa los periodos en los que la planta no puede generar energía o lo hace con menor rendimiento. Además, aunque en los periodos de **La Niña** los caudales son superiores a los históricos, cuando los caudales en una corriente son más altos, el efecto de la variabilidad, aunque perceptible, no incide significativamente en la producción de energía. Esto parece ser más notable cuando los caudales en la fuente son más bajos.

En el caso de la estación **El Cortijo**, la variación en la producción de energía para caudal aprovechable bajo las dos condiciones de caudal de servidumbre es de 6.81% y 2.44% para el escenario **La Niña**, y de 33% y 24.42% para el escenario de **No Variabilidad**. Esto demuestra que, cuando los caudales en la fuente son relativamente altos, la modificación en los valores de energía producida en los escenarios históricos no es significativa. Sin embargo, si no existiera esa variabilidad extrema natural, la producción se vería considerablemente disminuida.

8. CONCLUSIONES

De los más de dos centenares de métodos para la determinación del caudal ambiental se optó por utilizar el método hidrológico definido en el ENA 2022 para tal fin. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que existe gran diferencia entre los valores que condicionan el caudal aprovechable, encontrando para el río El Cofre que métodos que se consideran conservacionistas plantean un caudal ambiental igual al 20% del QMMM, mientras que la condición más restrictiva, según lineamientos ambientales para Colombia, determina un caudal que corresponde al 65% del QMMM.

El efecto de la variabilidad climática sobre los valores más restrictivos para determinar el caudal aprovechable para un desarrollo hidroeléctrico en el río El Cofre, es de un incremento del 12% para la condición favorable correspondiente a un año hidrológico La Niña y de reducción en un 45.2% de no existir variabilidad climática natural en la fuente, sobre el valor histórico, lo que contrasta con estudios en los que se han reportado para Colombia disminuciones del orden del 30% para periodos el Niño e incrementos de hasta el 60% para periodos La Niña en la cuenca del río Cauca.

En este estudio se encontró que los modelos ARIMA no replican los eventos atípicos de una serie de caudales correspondientes a periodos afectados por el fenómeno ENOS, pero si sirven como una herramienta para representar un escenario de NO Variabilidad.

Los modelos ARIMA replican el valor del caudal medio mensual multianual (QMMM) con una diferencia de entre el 7% y el 8% respecto del valor histórico según los resultados de este trabajo, pero eliminan el efecto de la variabilidad climática natural representada en los periodos de condiciones extremas y sobre dimensionan los caudales menores que el QMMM, por lo que se incrementa el caudal de servidumbre en un 14% respecto del que se tendría para la condición histórica más desfavorable (que se presenta para cuencas con un alto índice de regulación hídrica) e implica una reducción del 45% en el caudal aprovechable.

Los modelos ARIMA concentran los caudales en un rango normal de variación de entre -1σ y $+1\sigma$ (σ desviación estándar), con un nivel de confianza mayor al 95% sobre el valor del medio histórico. Por esta razón plantean un escenario de comparación importante, pues al suprimir los valores picos,

se refleja de manera satisfactoria la condición de no variabilidad lo que se constituye como una herramienta importante para simular series de caudales no afectados por variabilidad climática.

En cuanto a la potencia para la planta de generación con una altura útil de 100m, es el caudal de aprovechamiento obtenido a partir de la restricción correspondiente al 85% en la CDC la que logra la menor diferencia entre los valores de energía y factor de planta para las condiciones de máximo rendimiento y potencia hidráulica.

En cuanto a los términos asociados a la generación de energía eléctrica, la condición más drástica para caudal aprovechable y máxima eficiencia se tiene que para el escenario La Niña, donde se incrementa la producción de energía en un 11.7% y la potencia en 17%, mientras que para el escenario de No Variabilidad se reduce la generación en un 33% y la potencia en un 44.6%, para un factor de planta que no presenta variación considerable entre los escenarios. Para la condición de caudal aprovechable en el escenario La Niña la producción de energía se incrementa en un 11.9%, la potencia en un 10.9% y el escenario de No Variabilidad genera un 46.7% menos energía con una potencia que se reduce en un 45.4% mientras que el factor de planta permanece prácticamente invariable para las condiciones mencionadas respecto de los valores históricos.

La metodología planteada, al analizar las implicaciones de la variabilidad sobre la generación de energía, permite determinar la potencia instalada bajo una perspectiva diferente de la considerada actualmente, en la que solo se tiene en cuenta el registro histórico, además de hacer proyecciones de implicaciones adversas por la posibilidad de escenarios extremos.

De la validación de la metodología se encuentra que para períodos de variación La Niña el caudal medio mensual multianual se incrementa en un 9.5% respecto del histórico, mientras que el caudal ambiental lo hace en un 23.6% para un incremento del 11.5% en los valores de caudal aprovechable; mientras que para la condición de No Variabilidad el caudal medio mensual multianual se reduce en un 8%, el caudal ambiental para la condición más limitante se incrementa en un 5.45% con una reducción en el valor de caudal aprovechable del 28%. Que muestra que en cuencas de mayor producción el efecto de la variabilidad climática puede ser menos drástica sobre las limitaciones de uso del recurso en la fuente.

En cuanto a la producción de energía en la validación se obtiene que para el escenario La Niña en condición de máximo rendimiento y mayor restricción la producción se reduce en un 5.8 %, la potencia en un 10.9% mientras que el factor de planta resulta prácticamente inalterado, y para la condición de No variabilidad la generación se merma en un 27%, la potencia en un 31% y el factor de planta permanece inalterado. Para la condición de caudal aprovechable y máxima restricción en el escenario La Niña la producción de energía se reduce en un 2.4%, la potencia en un 11.4%, y para el escenario de No variabilidad la reducción en la producción de energía es del 24% y la potencia en un 28.1% respecto de la condición histórica. El factor de planta permanece invariable para los tres escenarios. Así que el hecho de que se incrementen los caudales en la fuente no significa necesariamente incremento de la capacidad de generación de energía producto de las restricciones por condiciones ambientales que pretenden estandarizarse.

No parece factible generalizar una condición restrictiva de caudal aprovechable en función del caudal de servidumbre porque las condiciones propias de cada desarrollo son determinantes en la producción de caudal, en su variación y por ende en la generación de energía eléctrica.

9. RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda tener en cuenta la revisión de las restricciones por caudal ambiental para Colombia (75% - 85% CDC), pues existen reportados métodos que se consideran conservacionistas y arrojan caudales de servidumbre menores que aquellos correspondientes al caudal ambiental según el ENA 2022. Esto impacta directamente la producción de energía bajo escenarios de variabilidad climática.

Para determinar los períodos de variabilidad climática se hizo una correlación estadística entre la temperatura superficial del Océano Pacífico en la zona 3.4 y el caudal en la fuente que resultó ser negativa y de baja intensidad, pero estadísticamente significativa. Esto amplía la posibilidad de estudios futuros sobre la teleconexión entre la temperatura superficial del Océano Pacífico, zona 3.4 y la hidrología continental en la región Andina colombiana

El ejercicio abre la ventana de estudio para determinar un procedimiento que permita maximizar las características de potencia instalada que favorezcan la producción de energía pues se observó que, para cualquier escenario de variabilidad analizado, el caudal de servidumbre correspondiente al percentil 85 en la CDC, procura la potencia más cercana a la de mayor rendimiento de la estación.

Se sugiere aplicar la metodología propuesta desagregando el análisis para determinar caudal aprovechable por cada uno de los meses del año.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abril-Salcedo, D. S., Melo-Velandia, L. F., & Parra-Amado, D. (2016). Impactos de los fenómenos climáticos sobre el precio de los alimentos en Colombia. *Ensayos Sobre Política Económica*, 34(80), 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.espe.2016.03.003>
- Achite, M., Bazrafshan, O., Azhdari, Z., Wałęga, A., Krakauer, N., & Caloiero, T. (2022). Forecasting of SPI and SRI Using Multiplicative ARIMA under Climate Variability in a Mediterranean Region: Wadi Ouahrane Basin, Algeria. *Climate*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/cli10030036>
- Aguirre Gómez, M. (1993). Análisis e interpretación de series de tiempo de calidad de agua para ríos en Puerto Rico.
- Ahmar, A. S., Guritno, S., Abdurakhman, Rahman, A., Awi, Alimuddin, Minggu, I., Tiro, M. A., Aidid, M. K., Annas, S., Sutiksno, D. U., Ahmar, D. S., Ahmar, K. H., Ahmar, A. A., Zaki, A., Abdullah, D., Rahim, R., Nurdianto, H., Hidayat, R., ... Arifin, A. N. M. (2018). Modeling Data Containing Outliers using ARIMA Additive Outlier (ARIMA-AO). *Journal of Physics: Conference Series*, 954(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/954/1/012010>
- Alejandro Camacho Botero, L. (2020). The paradox of the availability of poor water quality in the Colombian rural sector.
- Ardizzon, G., Cavazzini, G., & Pavesi, G. (2014). A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 31, pp. 746–761). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.043>
- Autologon. (n.d.). Índice normalizado de precipitación - Guía del usuario.
- Ayuga, E., González García, C., Montero, M. J., & Robredo, J. C. (n.d.). Modelos estadísticos de predicción ARIMA de precipitaciones en dos estaciones españolas representativas de dos grupos con diferentes características climáticas.
- Beyaztas, U., Shang, H. L., & Yaseen, Z. M. (2021). A functional autoregressive model based on exogenous hydrometeorological variables for river flow prediction. *Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126380>
- Bouznad, I.-E., Guastaldi, E., Zirulia, A., Brancale, M., Barbagli, A., & Bengusmia, D. (n.d.). Trend analysis and spatiotemporal prediction of precipitation, temperature, and evapotranspiration values using the ARIMA models: case of the Algerian Highlands. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06330-6/Published>
- Casanova O., J. F., & Figueroa C., A. (2015). DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL Y SU RELACIÓN CON VARIABLES INDICADORAS DE CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO. *Luna Azul*, 40, 05–24. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.2>
- Cerón, W. L., Carvajal-Escobar, Y., De Souza, R. V. A., Kayano, M. T., & López, N. G. (2020). Spatio-temporal analysis of the droughts in Cali, Colombia and their primary relationships with the

- El Niño-Southern Oscillation (ENSO) between 1971 and 2011. *Atmosfera*, 33(1), 51–69.
<https://doi.org/10.20937/ATM.52639>
- Chong, X. Y., Gibbins, C. N., Vericat, D., Batalla, R. J., Teo, F. Y., & Lee, K. S. P. (2021). A framework for Hydrological characterisation to support Functional Flows (HyFFlow): Application to a tropical river. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100838>
- de Viron, O., Dickey, J. O., & Ghil, M. (2013). Global modes of climate variability. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1832–1837. <https://doi.org/10.1002/grl.50386>
- Econometría. (2010).
- Escobar Díaz Andrés, Cortés Arenas Cristhian Leonardo, & Leguizamón Archila Juan Sebastián. (2018). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): una revisión. *Visión Electrónica Más Que Un Estado Sólido*, 111–126. <https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>
- Fang, J., Guo, X., Liu, Y., Chang, X., Fujita, H., & Wu, J. (2023). An attention-based deep learning model for multi-horizon time series forecasting by considering periodic characteristic. *Computers and Industrial Engineering*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109667>
- Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallo, K. L. (2021). Pruebas no paramétricas para determinar la aleatoriedad de los datos en procesos productivos y procedimientos para calcular estadísticas en pareja. *Ciencia, Economía y Negocios*, 5(1), 97–118.
<https://doi.org/10.22206/ceyn.2021.v5i1.pp97-118>
- García, M. C., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia*. *Revista de Ingeniería*, 36, 60–64. <https://doi.org/10.16924/revinge.36.11>
- García-Peñalvo, F. J. (2022). Desarrollo de estados de la cuestión robustos: Revisiones Sistemáticas de Literatura. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 23, e28600–e28600.
<https://doi.org/10.14201/EKS.28600>
- Gaviria, C. J., & Carvajal-Serna, L. F. (2020). Determinación de la variabilidad de la curva de duración de caudales por efectos no estacionarios en Colombia. *Ingeniería Del Agua*, 24(4), 269. <https://doi.org/10.4995/ia.2020.13556>
- Ghimire, B. N. (2017). Application of ARIMA Model for River Discharges Analysis. *Journal of Nepal Physical Society*, 4(1), 27. <https://doi.org/10.3126/jnphysoc.v4i1.17333>
- Gil, E., Morales, Y., & Ochoa, T. (2021). Addressing the effects of climate change on modeling future hydroelectric energy production in Chile. *Energies*, 14(1).
<https://doi.org/10.3390/en14010241>
- Gupta, A., & Kumar, A. (2022). Two-step daily reservoir inflow prediction using ARIMA-machine learning and ensemble models. *Journal of Hydro-Environment Research*, 45, 39–52.
<https://doi.org/10.1016/J.JHER.2022.10.002>

- Habeeb, B., Bastidas-Arteaga, E., Sánchez-Silva, M., & Dong, Y. (2024). Conditional seasonal markov-switching autoregressive model to simulate extreme events: Application to river flow. *Environmental Modelling and Software*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106066>
- Hernández, J., & Carvajal-Serna, F. (2017). Risk coverage in the face of hydrological variability in a run-off hydraulic power plant using weather derivatives. *Lecturas de Economía*, 87, 191–222. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n87a07>
- Hosseini, S. M. H., Forouzbakhsh, F., Fotouhi, M., & Vakilian, M. (2008). Determination of installation capacity in reservoir hydro-power plants considering technical, economical and reliability indices. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 30(6–7), 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2008.01.002>
- Hugo Ramírez-Builes, V., & Jaramillo-Robledo, Á. (2009). RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE OCEÁNICO DE EL NIÑO Y LA LLUVIA, EN LA REGIÓN ANDINA CENTRAL DE COLOMBIA. In *Cenicafé* (Vol. 60, Issue 2). <http://iri.columbia.edu>
- Introducción a Series de Tiempo Por: John Villavicencio CONTENIDO. (n.d.).
- José Edgar Montealegre Bocanegra. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia INFORME FINAL
-
- INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM-Subdirección de Meteorología.
- José Lozano Picón, R., Mario Esmeral Berrío, R., Amparo Alonso Másmela, G., Daniel Oviedo Arango, J., Pablo Ruiz Soto, J., Galvis Bautista, G., González Hernández, Y., OMAR VARGAS MARTÍNEZ Subdirector de Hidrología, N., Oficina Pronósticos Alertas, J., ANTONIO RAMOS SUÁREZ Jefe Oficina Asesora Jurídica, G., Quimbay Valencia, D., & Fernando Casas Vargas, J. (n.d.). MARÍA CLAUDIA GARCÍA DÁVILA Viceministra de Políticas y Normalización Ambiental Consejo Directivo ÁNGELA MARÍA OROZCO GÓMEZ Ministra de Transporte Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Karakoyun, Y., Hacı Dönmez, A., & Yumurtacı, Z. (n.d.). Comparison of environmental flow assessment methods with a case study on a runoff river-type hydropower plant using hydrological methods. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7107-3>
- Kedam, N., Tiwari, D. K., Kumar, V., Khedher, K. M., & Salem, M. A. (2024). River stream flow prediction through advanced machine learning models for enhanced accuracy. *Results in Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102215>
- Książek, L., Woś, A., Florek, J., Wyrębek, M., Młyński, D., & Wałęga, A. (2019). Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisłoka river, Poland: case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4). <https://doi.org/10.1007/S10661-019-7402-7>

- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., & Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110833>
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2019). Flow regime aspects in determining environmental flows and maximising energy production at run-of-river hydropower plants. *Applied Energy*, 256, 113980. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113980>
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2020). Water-energy-ecosystem nexus: Balancing competing interests at a run-of-river hydropower plant coupling a hydrologic–ecohydraulic approach. *Energy Conversion and Management*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113267>
- Kwakye, S. O., & Bárdossy, A. (2022). Quantification of the hydrological consequences of climate change in a typical West African catchment using flow duration curves. *Journal of Water and Climate Change*, 13(1), 26–42. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.147>
- Leong, C., & Yokoo, Y. (2021). A step toward global-scale applicability and transferability of flow duration curve studies: A flow duration curve review (2000–2020). *Journal of Hydrology*, 603, 126984. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126984>
- Lu, S. (2021). Research on GDP Forecast Analysis Combining BP Neural Network and ARIMA Model. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1026978>
- Meteorológica Mundial, O. (2018). Guía de prácticas climatológicas. <http://public>.
- Młyński, D., Wałęga, A., & Kuriqi, A. (2021). Influence of meteorological drought on environmental flows in mountain catchments. *Ecological Indicators*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108460>
- Moreira, E. E., Martins, D. S., & Pereira, L. S. (2015). Assessing drought cycles in SPI time series using a Fourier analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), 571–585. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-571-2015>
- Mukhawana, M. B., Kanyerere, T., Kahler, D., Masilela, N. S., Lalumbe, L., & Umunezero, A. A. (2024). Hydrological drought assessment using the standardized groundwater index and the standardized precipitation index in the Berg River Catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101779>
- Norberto Velasco Sánchez, A. (n.d.). INTEGRACIÓN DEL CONCEPTO DE VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS DE LARGO PLAZO DE RESOLUCIÓN MENSUAL EN COLOMBIA.
- Osorno-Cardona, Y. A., Mejia-Giraldo, D. A., & Muñoz-Galeano, N. (2018). Methodology for the stimulation of firm energy through desacoupled hidrical synthetic series. *Informacion Tecnologica*, 29(5), 35–46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500035>

- Paola Bianucci, S., & Garrote de Marcos, L. (2013). Gestión óptima de embalses en avenidas incorporando el concepto de incertidumbre. Aplicación a embalses con central hidroeléctrica.
- Pastor, A. V., Ludwig, F., Biemans, H., Hoff, H., & Kabat, P. (2014). Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 5041–5059. <https://doi.org/10.5194/HESS-18-5041-2014>
- Peña-Q, A., Bermudez-F, L., Ramírez-C, C., & Riaño-H, N. (2015). Oceanic Niño Index as a Tool to Determine the Effect of Weather on Coffee Plantation in Colombia. *American Journal of Experimental Agriculture*, 7(6), 395–404. <https://doi.org/10.9734/ajea/2015/15876>
- Pérez-Ortiz, M. A., Montenegro-Murillo, D. D., & Vargas-Franco, V. (2022). Analysis of the influence of climatic variability on precipitation in the Cali River basin, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 89(221), 168–177. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101607>
- Petelin, G., Cenikj, G., & Eftimov, T. (2023). Towards understanding the importance of time-series features in automated algorithm performance prediction. *Expert Systems with Applications*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119023>
- Pilar, M., Casimiro, G., & Casimiro, P. G. (n.d.). Análisis de series temporales: Modelos ARIMA.
- Sarango-Julca, D., Mejía-Marcacuzco Id, A., & Guevara-Pérez, E. (2020). Use of synthetic series of average monthly flows for planning the operation of the Peruvian interconnected electrical system.
- Schwarzwald, K., Lenssen, N., & by Timothy Palmer, E. (2022). The importance of internal climate variability in climate impact projections. <https://doi.org/10.1073/pnas>
- Sebastián, J., & Moreno, B. (2021). Índices Locales del Ciclo El Niño Oscilación del Sur para las Regiones Naturales de Colombia.
- Shakti, S. P., Hassan, M. K., Zhenning, Y., Caytiles, R. D., & N.Ch.S.N, I. (2017). Annual Automobile Sales Prediction Using ARIMA Model. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 10(6), 13–22. <https://doi.org/10.14257/ijhit.2017.10.6.02>
- Sobral, B. S., Oliveira-Júnior, J. F. de, de Gois, G., Pereira-Júnior, E. R., Terassi, P. M. de B., Muniz-Júnior, J. G. R., Lyra, G. B., & Zeri, M. (2019). Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. *Atmospheric Research*, 220, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.003>
- Temel, P., Kentel, E., & Alp, E. (2023). Development of a site selection methodology for run-of-river hydroelectric power plants within the water-energy-ecosystem nexus. *Science of The Total Environment*, 856, 159152. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159152>
- Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador. (n.d.).

- Vargas Mora, T. et al., Velázquez, P., Augusto Cotutor, M., & Sorribes, M. (2022). UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente Evaluación de los pronósticos de sequía a escala estacional.
- Yildiz, V., Milton, R., Brown, S., & Rougé, C. (2023). Technical note: Statistical generation of climate-perturbed flow duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(13), 2499–2507. <https://doi.org/10.5194/hess-27-2499-2023>
- Zafra-Mejía, C. A., Rondón-Quintana, H. A., & Urazán-Bonells, C. F. (2024). ARIMA and TFARIMA Analysis of the Main Water Quality Parameters in the Initial Components of a Megacity's Drinking Water Supply System. *Hydrology*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology11010010>
- Zambrano Mera, Y. E., Rivadeneira Vera, J. F., & Pérez-Martín, M. Á. (2018). Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast. *Science of the Total Environment*, 643, 193–207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.160>
- Zhang, X. run, Zhang, D. rong, & Ding, Y. (2021). An environmental flow method applied in small and medium-sized mountainous rivers. *Water Science and Engineering*, 14(4), 323–329. <https://doi.org/10.1016/J.WSE.2021.10.003>
- Zhang, Y., Yamamoto, M., Suzuki, G., & Shioya, H. (2022). Collaborative Forecasting and Analysis of Fish Catch in Hokkaido From Multiple Scales by Using Neural Network and ARIMA Model. *IEEE Access*, 10, 7823–7833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141767>

