

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FENÓMENO EL NIÑO OSCILACIÓN DEL
SUR (ENOS) EN SUS FASES EXTREMAS SOBRE LA OFERTA HÍDRICA DE LA
CUENCA DEL RÍO PATÍA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA
ENFASIS EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**

**PABLO GABRIEL VALENCIA SANCHEZ
COD: 2103614**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN
INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS Y SUELOS (IREHISA)**

**DIRECTOR
Ing. PhD YESID CARVAJAL ESCOBAR**

**DIRECTORA
Ing. PhD TERESITA CANCHALA NASTAR**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA – EIDENAR
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2023**

A Dios por guiarme y darme la vida,

A mi familia por su incondicional apoyo,

A Teresita por su amor y estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis, Yesid Carvajal y Teresita Canchala por sus enseñanzas, confianza y apoyo en mi formación profesional en investigación.

A las estudiantes de semilleros de investigación Ana Bedoya y Nathalia Martínez por su colaboración y buena disposición en las actividades que realizaron en el marco de esta investigación.

Al proyecto de investigación CI 21171 denominado “Evaluación de la influencia de índices climáticos del Océano Pacífico Tropical sobre la variabilidad de caudales de la cuenca del Río Patía” por el soporte económico para el desarrollo de esta investigación.

A todos los profesores e integrantes del grupo IREHISA que hicieron parte de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	7
ABSTRACT	9
1 DEFINICION DEL PROBLEMA	11
2 JUSTIFICACION	12
3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	13
3.1 FENÓMENO EL NIÑO OSCILACIÓN DE SUR (ENOS).....	13
3.1.1 <i>Origen del fenómeno ENOS</i>	<i>13</i>
3.1.2 <i>Descripción del fenómeno ENOS.....</i>	<i>14</i>
3.1.3 <i>Variables océano-atmosféricas asociadas con la hidroclimatología del suroccidente colombiano</i>	<i>16</i>
3.1.3.1 Índice de Oscilación del Sur (SOI)	16
3.1.3.2 Anomalías de la temperatura superficial del Océano Pacífico	16
3.1.3.3 Índice Oceánico El Niño – ONI	17
3.1.3.4 Índice Multivariado ENOS – MEI.....	17
3.1.3.5 Oscilación Decadal del Pacífico – PDO	17
3.1.3.6 Niño Modoki (EMI).....	17
3.1.3.7 Niño Trans (TNI)	18
3.2 OFERTA HÍDRICA	18
3.2.1 <i>Definición de oferta hídrica</i>	<i>18</i>
3.2.2 <i>Importancia del cálculo de la oferta hídrica y su relación con los fenómenos macroclimáticos de gran escala.....</i>	<i>19</i>
3.3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: CUENCA RÍO PATÍA.....	22
4 OBJETIVOS	26
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	26
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
5 METODOLOGÍA	26
5.1 OBJETIVO 1.....	26
5.1.1 <i>Definición del área de estudio</i>	<i>26</i>
5.1.2 <i>Recolección de información</i>	<i>28</i>
5.1.3 <i>Caracterización morfométrica</i>	<i>29</i>
5.1.3.1 Determinación de las características morfométricas y fisiográficas	30
5.1.3.2 Índices y coeficientes de Forma.....	31
5.1.3.3 Pendiente media de la cuenca (S).....	32
5.1.3.4 Elevación de la cuenca	33
5.1.3.4.1 Curva hipsométrica.....	33
5.1.3.4.2 Elevación media de la cuenca (E_m)	34
5.1.3.5 Red de drenaje.....	34
5.1.3.6 Cálculo del tiempo de concentración	36
5.1.3.7 Optimización del cálculo de características morfométricas y fisiográficas	37
5.1.4 <i>Tratamiento de datos hidrometeorológicos.....</i>	<i>37</i>

5.1.4.1	Determinación de consistencia y homogeneidad.....	38
5.1.4.1.1	Prueba T.....	38
5.1.4.1.2	Cambios en la Media	39
5.1.4.2	Cambio Varianza prueba F.....	40
5.1.4.3	Desarrollo de análisis de tendencia, pendiente y puntos de quiebre en las series temporales.	41
5.1.4.3.1	Prueba de tendencia de Mann-Kendall	41
5.1.4.3.2	Pendiente de Sen.....	42
5.1.4.3.3	Prueba de Pettitt	42
5.1.5	<i>Caracterización hidroclimatológica</i>	43
5.1.6	<i>Estimación de la oferta hídrica</i>	43
5.1.6.1	Transposición de caudales	44
5.1.6.2	método lluvia escorrentía SCS	44
5.1.6.2.1	Clasificación Hidrológica De Los Suelos En La Microcuenca.....	46
5.1.6.2.2	Uso de suelo	46
5.1.6.2.3	Humedad antecedente	48
5.1.6.3	Modelo de Thomas	49
5.2	OBJETIVO 2.....	52
5.2.1	<i>Selección de índices macroclimáticos</i>	52
5.2.2	<i>Influencia de índices macroclimáticos asociado a ENOS</i>	53
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	54
6.1	OBJETIVO 1.....	54
6.1.1	<i>Caracterización morfométrica</i>	54
6.1.2	<i>Tratamiento de datos hidrometeorológicos</i>	62
6.1.2.1	Análisis exploratorio	62
6.1.2.2	Completado de datos faltantes.....	63
6.1.2.3	Análisis de homogeneidad.....	66
6.1.2.4	Análisis de tendencia	70
6.1.3	<i>Caracterización Hidroclimatológica</i>	71
6.1.3.1	Caracterización de caudales	71
6.1.3.2	Caracterización de precipitaciones.....	73
6.1.4	<i>Estimación de la oferta hídrica</i>	75
6.1.4.1	Transposición de caudales Río Mira	76
6.1.4.2	Método lluvia escorrentía SCS	79
6.1.4.3	Modelo de Thomas	80
6.2	OBJETIVO 2.....	87
6.2.1	<i>Correlaciones entre caudal e índices macroclimáticos – ENOS</i>	87
6.2.2	<i>Análisis de Composiciones</i>	91
7	CONCLUSIONES	100
8	RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION	102
9	BIBLIOGRAFÍA	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones hidrométricas cuenca Río Patía	26
Tabla 2. Estaciones pluviométricas consideradas en la cuenca río Patía	27
Tabla 3. Características morfométricas básicas de una cuenca.....	30
Tabla 4. Resumen de índices y coeficientes de forma para clasificación de cuencas.	31
Tabla 5. Clasificación del relieve de las cuencas de acuerdo con la pendiente media	32
Tabla 6. Características con respecto al relieve de la cuenca.....	34
Tabla 7. Características de la red de drenaje de una cuenca.....	35
Tabla 8. Características morfométricas de la red de drenaje de una cuenca.....	36
Tabla 9. Formulas empleadas para el cálculo del Tc.....	36
Tabla 10. Clasificación grupo hidrológico.....	46
Tabla 11. Numero de Curva según uso de suelo y grupo hidrológico	47
Tabla 12. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS	49
Tabla 13. Niveles de desempeño estadístico.....	51
Tabla 14. Índices macroclimáticos de tipo Atmosférico	52
Tabla 15. Índices macroclimáticos de tipo oceánico.....	52
Tabla 16. Parámetros fisiográficos subcuencas río Patía.....	56
Tabla 17. Características morfométricas.....	57
Tabla 18. Caracterización morfométrica	58
Tabla 19. Resumen coeficientes morfométricos por región de la cuenca río Patía.....	62
Tabla 20. Estadísticos básicos estaciones hidrométricas cuenca río Patía	62
Tabla 21. Estadísticos básicos estaciones pluviométricas cuenca río Patía	63
Tabla 22. Estadísticos básicos series completas de caudal y calculo error relativo.....	64
Tabla 23. Estadísticos básicos series completas de precipitación y calculo error relativo	65
Tabla 24. Resultados pruebas de homogeneidad datos estaciones de caudal.....	67
Tabla 25. Resultados pruebas de homogeneidad datos estaciones de precipitación	69
Tabla 26. Estimación de tendencia estaciones de caudal	70
Tabla 27. Estimación de tendencia estaciones de precipitación	71
Tabla 28. Ciclo anual caudales estaciones los Nortes (NOR), Sali (SAL), Puente Guasca (PTG) y Agroyaco (AGR).....	72
Tabla 29. Ciclo anual precipitación total mensual multianual CRA río Patía	73
Tabla 30. Ciclo anual precipitación total mensual multianual CRP río Patía	74
Tabla 31. Parámetros morfométricos usados en la transposición de caudales cuenca río Mira (MIR).....	77
Tabla 32. Parámetros método SCS	80
Tabla 33. Parámetros modelo de Thomas (a, b, c, d).....	82
Tabla 34. Niveles de desempeño estadístico calibración modelo Thomas cuenca río Mira	82
Tabla 35. Oferta hídrica ENA 2018	85
Tabla 36. Cálculo de error caudales estimados con respecto al ENA 2018 para la cuenca PMED(a), TLB(b) y PBAJ(c).....	86
Tabla 37. Cálculo del error total para la cuenca Patía	86
Tabla 38. Matriz de correlaciones de Pearson caudales e índices macroclimáticos ENOS	89
Tabla 39. Selección de eventos - Análisis de Composiciones caudales estacionales – SZH Guáitara.....	92
Tabla 40. Selección de eventos - Análisis de Composiciones caudales estacionales – SZH Telembí.....	93
Tabla 41. Selección de eventos - Análisis de Composiciones caudales estacionales – SZH Patía Bajo ..	95
Tabla 42. Rendimiento de Caudal por SZHs comparación ENA 2018 y Periodo normal (a), LN (b) y EN (c)	98

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Regiones de desarrollo y monitoreo del fenómeno El Niño sobre el océano Pacífico tropical. ...	14
Figura 2. Comportamiento de la relación océano atmósfera durante eventos ENOS extremos	15
Figura 3. Localización cuenca río Patía, rango de elevación y red hídrica.....	24
Figura 4. Cuenca río Patía, mapa geológico.....	25
Figura 5. Subzonas hidrográficas cuenca río Patía	28
Figura 6. Parámetros morfométricos básicos de una cuenca.....	30
Figura 7. Hidrógrafas para cuencas con misma área y forma diferente.	31
Figura 8. Metodología para el cálculo de la pendiente media de la cuenca por medio del método de Alvord.	32
Figura 9. Metodología para la construcción de la curva hipsométrica.	33
Figura 10. Curva hipsométrica característica del ciclo erosivo	33
Figura 11. Metodología para el cálculo de la elevación media por el método de área-elevación.	34
Figura 12. Uso del suelo cuenca río Patía	47
Figura 13. Modelo conceptual abcd	49
Figura 14. Serie temporal caudal medio mensual estación Los Nortes datos originales y estimados en el completado de datos	64
Figura 15. Serie temporal precipitación total mensual estación Remolino datos originales y estimados en el completado de datos	65
Figura 16. Ciclo anual estaciones, Los Nortes (a), Sali (b), Pte Guasca (c) y Agroyaco (d)	72
Figura 17. Ciclo anual de precipitación total media multianual estaciones CRA río Patía	74
Figura 18. Ciclo anual de precipitación total media multianual estaciones CRP río Patía	75
Figura 19. Cuenca río Mira hasta estación MIR.....	77
Figura 20. Histogramas de caudales transposición de caudales (a) Telembí, (b) Patía Medio (c) Patía Bajo	78
Figura 21. Precipitación media por subcuenca (a) Patía Medio, (b) Telembí y (c) Patía Bajo	79
Figura 22. Histogramas de caudales método SCS	80
Figura 23. Precipitación (a) y evapotranspiración (b) media de la cuenca Río Mira	81
Figura 24. Calibración (a) y validación (b) del modelo cuenca río Mira	82
Figura 25. Evapotranspiración media por subcuenca (a) Patía Medio, (b) Telembí y (c) Patía Bajo	83
Figura 26. Histogramas de caudal modelo Thomas por subcuenca (a) Patía Medio, (b) Telembí y (c) Patía Bajo.....	84
Figura 27. Histograma de caudal total cuenca río Patía	87
Figura 28. Correlaciones de Pearson con índices macroclimáticos – ENOS	90
Figura 29. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Guaitara – AGR. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.	92
Figura 30. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Patía Medio. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.	93
Figura 31. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Telembí. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.	94
Figura 32. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Patía Bajo. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.	95
Figura 33. Análisis de composiciones caudales estacionales. a) Guaitara b) Patía Alto c) Patía Medio d) Telembí y e) Patía Bajo	97
Figura 34. Oferta hídrica en función de rendimiento de caudales por SZH en periodos LN, Normal y EN.99	99

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es evaluar la influencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en sus fases extremas sobre la oferta hídrica mensual en las cuencas región Andina (CRA) y cuencas región Pacífico (CRP) del Río Patía con fines de ordenamiento. La cuenca del río Patía, ubicada en el suroeste de Colombia (entre los departamentos de Nariño y Cauca) está sujeta a una alta variabilidad hidrológica, las CRA conformadas por las subzonas hidrológicas (SZH) Guátara y Patía Alto, tienen un área total aproximada de 13.047km^2 y un caudal medio de $367.87\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, las cuales disponen de una buena instrumentación e información para conocer su comportamiento hídrico, mientras que las CRP conformada por la SZH de Patía Medio, Telembí y Patía Bajo con un área aproximada de 9.545km^2 y un caudal medio de $1.194\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, las cuales son poco instrumentadas en cuanto a información hidrométrica, por lo tanto es de gran importancia establecer algunos métodos para determinar la oferta hídrica en esta región y conocer así su comportamiento ante la presencia de fenómenos de variabilidad climática como el fenómeno ENOS.

Esta investigación se desarrolló con información de 27 estaciones hidrométricas (24 CRA y 3 CRP) Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en cuanto a precipitación se utilizaron 14 estaciones (7 CRA y 7 CRP) con las cuales se buscó establecer la oferta hídrica en las CRP mediante la aplicación de 3 métodos: i) Método del Soil Conservation Service (SCS), ii) Transposición de caudales del río Mira, cuenca que se encuentra en la misma región y cuenta con estación hidrométrica cerca de su desembocadura al océano Pacífico, y iii) Modelación para lo cual se calibro y valido el modelo de Thomas con información de la cuenca del río Mira. Los resultados mostraron que la mejor metodología fue el modelo de Thomas, ya que los errores estimados comparados con los resultados obtenidos con el estudio nacional del agua 2018 (ENA 2018) fueron del 43% para Patía Medio, 5% para el río Telembí y 1.04% para Patía bajo, con un error para la oferta total de la cuenca río Patía de 0.97%.

Para establecer la influencia de los índices climáticos de gran escala sobre los caudales de las CRA y CRP se correlacionaron los caudales mensuales de las estaciones con 10 índices océano-atmosféricos de gran escala vinculados con el fenómeno ENOS (SOI, TNI, MEI, PDO, EMI, Niño 4, Niño 3+4, ONI, Niño 3, y Niño 1+2). La mayor correlación directa (inversa) resultó con el índice SOI (Niño 3+4), en general las CRA tienen mayor correlación con los índices ENOS y las CRP tienen una correlación débil.

Para determinar y evaluar la influencia del fenómeno ENOS en sus fases extremas sobre la oferta hídrica mensual en las CRA y CRP del Río Patía se realizó el análisis de composiciones por SZH. Las CRA compuestas por las SZH del río Guátara y Patía alto registran en ocurrencia de fenómeno La Niña "LN" (El Niño "EN") la oferta hídrica se ve incrementada (disminuida) en un 38.87% y 67.51% (28.76% y 61.24%) respectivamente. Para las CRP compuesta por la SZH Patía Medio, río Telembí y Patía Bajo registra en la ocurrencia de eventos EN(LN) los caudales se disminuyen (incrementan) en 47.64%, 33.63% y 27.69% (50.13%, 35.24% y 32.4%) respectivamente, esto puede ser

influyendo por la cobertura vegetal densa que existe en esta zona la cual ayuda a regular los caudales en eventos extremos, considerando que esta región hace parte del Choco Biogeográfico Colombiano catalogada como una zona de almacenamiento de biodiversidad (hotspot) que alberga aproximadamente el 3% de las especies de plantas mundiales (Ceron et al., 2021), adicionalmente se caracteriza por altas precipitaciones las cuales pueden alcanzar hasta los 8000 mm/año (Poveda & Mesa, 2000).

Palabras Clave: Caudal, correlación, análisis de composición, índices océano-atmosféricos.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the influence of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon in its extreme phases on the monthly water supply in the Andean region (CRA) and Pacific region (CRP) basins of the Patía River for management purposes. The Patía river basin, located in the southwest of Colombia (between the departments of Nariño and Cauca) is subject to high hydrological variability. The CRAs made up of the Guáitara and Patía Alto hydrological subzones (SZHs) have a total area of approximately 13,047km² and an average flow of 367.87m³.s⁻¹, which have good instrumentation and information to know their water behavior, while the CRPs made up of the SZHs of Patía Medio, Telembí and Patía Bajo with an approximate area of 9,545km² and an average flow of 1,194m³.s⁻¹, which are poorly instrumented in terms of hydrometric information, therefore it is of great importance to establish some methods to determine the water supply in this region and thus know its behavior before the presence of climate variability phenomena such as the ENSO phenomenon.

This research was developed with information from 27 hydrometric stations (24 CRA and 3 CRP) Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), in terms of precipitation, 14 stations (7 CRA and 7 CRP) were used with which it was sought to establish the water supply in the CRPs through the application of 3 methods: i) Soil Conservation Service (SCS) method, ii) Transposition of flows of the Mira river, a basin that is located in the same region and has a hydrometric station near its mouth to the Pacific Ocean, and iii) Modeling for which the Thomas model was calibrated and validated with information from the Mira river basin. The results showed that the best methodology was the Thomas model, since the estimated errors compared to the results obtained with the 2018 national water study (ENA 2018) were 43% for Patía Medio, 5% for the Telembí river and 1.04 % for Patía Bajo, with an error for the total supply of the Patía river basin of 0.97%.

To establish the influence of large-scale climatic indices on the flows of the CRA and CRP, the monthly flows of the stations were correlated with 10 large-scale ocean-atmospheric indices linked to the ENSO phenomenon (SOI, TNI, MEI, PDO, EMI, Niño 4, Niño 3+4, ONI, Niño 3, and Niño 1+2). The highest direct (inverse) correlation resulted with the SOI index (Child 3+4), in general the CRA have a higher correlation with the ENSO indices and the CRP have a weak correlation.

To determine and evaluate the influence of the ENSO phenomenon in its extreme phases on the monthly water supply in the CRA and CRP of the Patía River, composition analysis was carried out by SZH. The CRA composed of the SZH of the Guáitara and Alto Patía rivers register the occurrence of the La Niña “LN” (El Niño “EN”) phenomenon, the water supply is increased (decreased) by 38.87% and 67.51% (28.76% and 61.24 %) respectively. For the CRP composed of the SZH Patía Medio, the Telembí River and Patía Bajo, the occurrence of EN(LN) events records the flow rates decreasing (increasing) by 47.64%, 33.63% and 27.69% (50.13%, 35.24% and 32.4%) respectively, this may be influenced by the dense vegetation cover that exists in this area which helps regulate

flows in extreme events, considering that this region is part of the Colombian Biogeographic Choco cataloged as a biodiversity storage area (hotspot) that It is home to approximately 3% of the world's plant species (Ceron et al., 2021), and is also characterized by high rainfall that can reach up to 8000 mm/year (Poveda & Mesa, 2000).

Keywords: Discharge, correlation, composition analysis, oceanic-atmospheric indices.

1 DEFINICION DEL PROBLEMA

De acuerdo con el sistema mundial de información de la Organización de las Naciones Unidas sobre agua y agricultura (Aquastat, 2011), se espera que para el año 2030 el 47% de la población mundial experimente una fuerte escasez de agua, razón por la cual toma importancia la protección de los recursos hídricos por parte de las diferentes naciones del mundo. De acuerdo con Olmos & Paz (2015), América Latina posee abundantes recursos hídricos ya que tiene aproximadamente el 35% del agua dulce en todo el mundo; sin embargo, solo el 20% de la población tiene acceso a suministro y saneamiento adecuado, indicando una deficiente gestión de los recursos hídricos.

En este contexto, Colombia cuenta con abundantes recursos hídricos, de acuerdo con IDEAM (2019), el país registra una oferta total de 2'023.113 Mm³, siendo el Pacífico una de las áreas hidrográficas con mayor escorrentía. Sin embargo, registra dificultades para mantener su ciclo de regeneración, razón por la cual frente a la amenaza de la escasez futura del recurso hídrico a nivel mundial toma importancia el ciclo del agua y la gestión integral de los recursos hídricos para equilibrar la oferta y demanda de agua en sectores como la agricultura, la industria y el uso urbano (Senante et al., 2013). En las últimas décadas, esta necesidad se ha incrementado ya que la disponibilidad del recurso hídrico se ha visto afectada por el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos vinculados principalmente al cambio climático y fenómenos de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (UNGRD, 2018).

De acuerdo con Canchala et al., (2020a), la hidroclimatología del suroeste Colombiano (Departamento de Nariño) es influenciada por el fenómeno ENOS, aunque su influencia difiere entre las regiones naturales Andina y Pacífico. Las precipitaciones en la Región Andina registraron correlaciones negativas con los índices asociados a ENOS identificando una relación inversa, mientras que las precipitaciones de la Región Pacífico mostraron correlaciones positivas (negativas) con la temperatura superficial del mar de las regiones Niño1+2 y Niño3 (Niño 3.4 y Niño 4) del Océano Pacífico Tropical, indicando una relación directa (inversa) con los índices oceánicos asociados a ENOS (Canchala et al., 2020b), los cuales a su vez pueden provocar episodios de sequía e inundaciones y traer consigo efectos socioeconómicos adversos.

En el suroeste colombiano se encuentra la cuenca del río Patía la cual nace en el macizo colombiano en la vertiente occidental de la cordillera Central sobre la Región Andina, atraviesa la cordillera Occidental, y desemboca en el Océano Pacífico. Según Canchala et al., (2020c) los caudales de la cuenca alta del río Patía tienen relación directa (inversa) con índices atmosféricos (oceánicos) del fenómeno ENOS.

Con respecto a la oferta hídrica superficial para la cuenca del Río Patía se identificó que las Cuencas de la Región Andina (CRA) están bien instrumentadas con un número significativo de estaciones hidrométricas, en contraste las Cuencas de la Región Pacífico (CRP) tienen pocas estaciones para lo cual la única fuente de información oficial para esta zona es el ENA; en el estudio de Velázquez & Poveda (2019) estimaron la escorrentía media anual para los principales ríos del Pacífico Colombiano en el cual se

incluyó la cuenca del río Patía y contrastaron sus resultados con el ENA 2014 a la salida de las cuencas y con las estaciones hidrométricas del IDEAM hasta el área aferente de la estación más próxima a su desembocadura, lo cual reafirma la necesidad de realizar una estimación de la oferta hídrica para las CRP.

Por lo tanto, considerando la influencia de ENOS diferenciada en las precipitaciones en la Región Andina y Región Pacífico del departamento de Nariño, se identifica la necesidad de establecer si existe una influencia diferenciada del fenómeno ENOS sobre la oferta hídrica en las CRA y CRP del río Patía. Por lo tanto, esta investigación busca responder la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es la influencia del fenómeno océano atmosférico ENOS sobre la oferta hídrica estacional de la CRA y CRP del río Patía?

2 JUSTIFICACION

Colombia es un país vulnerable a los riesgos hidrometeorológicos tales como desbordamiento de ríos, inundaciones, deslizamiento de tierra, entre otros; causados por fenómenos de diferentes escalas espaciotemporales (Poveda et al., 2002); otro fenómeno que afecta considerablemente al país es la sequía la cual se ha incrementado en los últimos años debido principalmente al cambio climático (Triana Madrid, 2021). Los regímenes hidroclimáticos de Colombia están determinados principalmente por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, y otros factores que contribuyen significativamente como la orografía de la Cordillera de los Andes (Urrea et al., 2019), la corriente de Chorro del Choco (Yepes et al., 2019), procesos de retroalimentación tierra atmósfera (Poveda & Mesa, 1997), y procesos océano atmosféricos que se producen en el océano Pacífico principalmente (Poveda, 2004).

Dentro de los procesos océano-atmosféricos se encuentra el fenómeno interanual ENOS, que afecta la dinámica de las lluvias en las regiones tropicales y causa sequías y / o inundaciones en las cuencas hidrográficas involucradas (Poveda et al., 2011), generando impactos negativos en la economía, la biodiversidad y la salud humana en Colombia. La fase El Niño (EN) se asocia con disminución de la precipitación, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el caudal, principalmente en el centro, norte y oeste de Colombia (Bocanegra et al., 2000; Poveda et al., 2001; Poveda et al., 2002; Puertas Orozco & Carvajal Escobar, 2008). Por su parte, la fase La Niña (LN) está vinculada con patrones opuestos de las variables mencionadas.

Colombia presenta algunas regiones con características orográficas y condiciones hidroclimáticas complejas que deben ser analizadas en detalle porque influyen en la génesis y dinámica de la variabilidad climática regional como el Chocó Biogeográfico Colombiano (CBC), región cuya hidroclimatología está modulada por los procesos océano-atmosféricos entre los Andes colombianos y el Océano Pacífico oriental (Poveda, 2004). Esta región es considerada una de las más lluviosas del planeta porque su precipitación media anual supera los 12,500 mm (Poveda et al., 2014), precipitaciones que son debidas a la Corriente de Chorro del Chocó (CJ, por sus siglas en inglés), la cual trae gran cantidad de humedad a la región Pacífico de Colombia contribuyendo a la intensificación de los procesos de convección (Bedoya-Soto et al., 2019).

En el extremo sur del CBC, en el departamento de Nariño y Cauca se encuentra localizada la Cuenca del Río Patía, que nace en el Macizo Colombiano en la vertiente occidental de la Cordillera Central de los Andes. Esta cuenca se encuentra próxima al Océano Pacífico Tropical, lo que la hace sensible al fenómeno de variabilidad interanual ENOS (Avila Díaz et al., 2014; Canchala et al., 2020c; Tedeschi et al., 2013).

Diferentes estudios han establecido que durante eventos EN se registra reducción del caudal en Colombia, mientras que durante eventos LN se registra un aumento de caudal e incremento de deslizamientos de tierra (Poveda et al., 2011). Sin embargo, estudios recientes de las teleconexiones con índices macroclimáticos asociados al fenómeno ENOS mostraron que la precipitación en subregiones del departamento de Nariño puede ser influenciada de diferente forma por el fenómeno ENOS (Canchala et al., 2020a), indicando cambios importantes en la variabilidad hidroclimatológica incluso en pequeñas distancias, los cuales pueden estar inducidos por la topografía de la región, y por la ubicación respecto al Océano Pacífico Tropical.

En este sentido, considerando que el caudal se constituye en un índice importante para determinar la variabilidad hidroclimática de una región (Coulibaly & Burn, 2004), que integra espacial y temporalmente variables climáticas como precipitación, temperatura, evaporación entre otras (Siam & Eltahir, 2015); en esta propuesta de investigación se evaluó la influencia del fenómeno ENOS sobre la oferta hídrica mensual en las CRA y CRP, conocimiento que permitirá una mejor gestión y planificación del recurso hídrico en esta región y su territorio.

3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 Fenómeno El Niño Oscilación de Sur (ENOS)

3.1.1 Origen del fenómeno ENOS

Según Maturana et al., (1997), el origen más aceptado del fenómeno ENOS se relaciona con la observación de los pescadores artesanales al encontrar aguas inusualmente cálidas frente a las costas de Perú en períodos estacionales. Durante la época navideña, se percibió un incremento en la temperatura del agua, lo cual llevó a los pescadores a denominar a este fenómeno como "El Niño" (EN), en alusión al recién nacido niño Jesús. A medida que la industria pesquera peruana de la anchoveta (*Engraulis ringens*) se desarrolló en la década de 1960, se generó un mayor interés en comprender el fenómeno EN. Actualmente, se sabe que los pescadores peruanos denominaban "la corriente de El Niño" a una corriente estacional cálida que se desplaza de norte a sur a lo largo de la costa de Ecuador y Perú. Esta corriente se forma cada año aproximadamente a partir de diciembre, y se enfrenta y desplaza a la conocida corriente fría de Humboldt que se extiende desde Chile hasta Perú.

3.1.2 Descripción del fenómeno ENOS

Debido al continuo descenso del recurso agua dulce per cápita a nivel mundial (Bank, 2017), es necesario ampliar la comprensión y el seguimiento de las dinámicas temporales y espaciales de variables como la precipitación, el caudal de los ríos y el nivel de los acuíferos. Uno de los factores a estudiar es la variabilidad climática interanual, ya que entenderlo puede determinar el modelo climático que tiene mayor impacto en las variables hídricas. Hasta el momento se ha determinado que, a escala interanual el fenómeno ENOS es uno de los patrones climáticos que mayor impacto tiene sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, ya que corresponde a un evento climático natural que se desarrolla en el océano Pacífico ecuatorial central (Trenberth & Stepaniak, 2000). de forma más precisa se localiza entre la costa de América del Sur y la línea de cambio de fecha internacional (meridiano 180°) (Ver Figura 1).

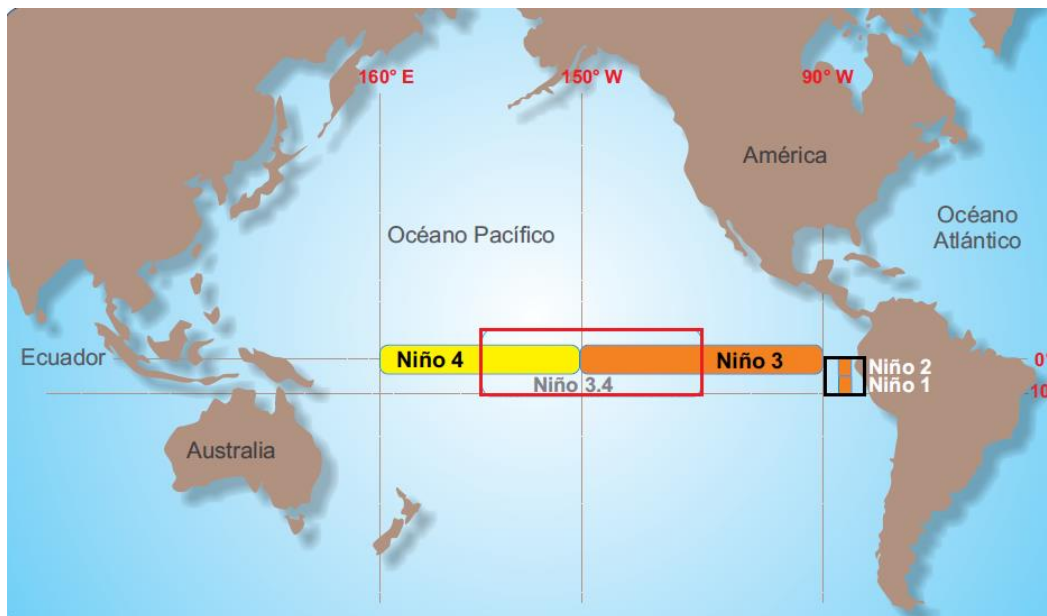


Figura 1. Regiones de desarrollo y monitoreo del fenómeno El Niño sobre el océano Pacífico tropical.
Fuente: Centro de monitoreo RIMAC

La intensidad de este fenómeno depende en gran medida del tamaño de la interacción océano-atmósfera y del área que cubre el Océano Pacífico Tropical. Esta interacción ocasiona anomalías positivas y negativas en la Temperatura Superficial del Mar (TSM), acompañadas de variaciones en el campo de la presión atmosférica en superficie, las cuales influyen sobre el clima en diferentes partes del planeta (Bedoya et al., 2010); (Tedeschi et al., 2015)). Otro componente importante corresponde a las variaciones que se presentan en la humedad terrestre reciclada que se ve afectada por la anomalías de la TSM que afectan de forma más directa el comportamiento de las precipitaciones en el hemisferio norte y sur con disminución y aumento, respectivamente (Posada-Marín et al., 2023).

El impacto climático depende de la época del año en que se produce el fenómeno, en general, el mayor impacto ocurre entre diciembre y abril, debido a que en el Pacífico

ecuatorial la temperatura superficial es más alta en esta época del año (Bedoya et al., 2010). Por tanto, el ligero cambio en la TSM puede conducir a una importante redistribución de la precipitación.

El fenómeno ENOS presenta dos fases extremas opuestas conocidas como EN y La Niña (LN). Estudios sobre los efectos de cada fase sobre regiones del continente suramericano muestran cómo ENOS está asociado con cambios en la circulación atmosférica, la precipitación (Montealegre, 2009), eventos extremos de precipitación, niveles de caudales en los ríos (Beltrán García, 2018) y en la variación de la humedad terrestre reciclada (Posada-Marín et al., 2023). Durante el fenómeno ENOS en el continente suramericano las anomalías atmosféricas se modifican por la interacción con la superficie haciendo que los efectos sean diferentes para cada región. Los estudios también han mostrado que el impacto de ENOS sobre las variables como la precipitación y la temperatura se propaga de oeste a este del continente (Beltrán & Díaz, 2020).

La fase cálida de ENOS conocida como EN se manifiesta, principalmente, por un aumento de la TSM y una disminución de los vientos alisios en el lado este del Océano Pacífico (Maturana et al., 1997) este fenómeno persiste en promedio durante doce meses, con una recurrencia de 2 a 7 años (Bedoya et al., 2010; Maturana et al., 1997). Esta anomalía oceanográfica del aumento de la TSM está relacionada con cambios en las condiciones atmosféricas a una escala global.

Por su parte, la fase fría del fenómeno ENOS conocida como LN se manifiesta con el comportamiento contrario a EN, donde se presenta una disminución en la TSM, que corresponde a un enfriamiento por encima de la temperatura normal del Océano Pacífico Tropical (OPT). Las características de LN son más frías que las condiciones normales del Océano Pacífico Oriental y más húmedas y cálidas que las condiciones normales en el Océano Pacífico de la zona Oeste (Bedoya et al., 2010). En la Figura 2, los colores más rojos indican aguas más cálidas, mientras que los azules oscuros y verdes indican aguas más frías. Durante el evento EN, el calentamiento de la temperatura de la superficie del Océano Oriental descende la termoclina, aumentando la humedad de la circulación atmosférica y el clima seco en el oeste (Ashok & Yamagata, 2009).

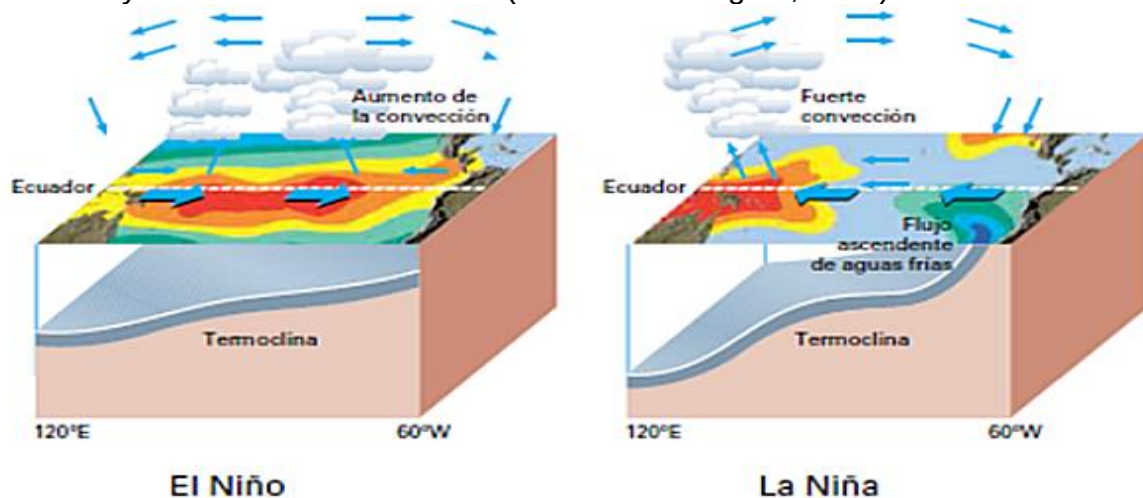


Figura 2. Comportamiento de la relación océano atmósfera durante eventos ENOS extremos
Fuente: Organización Meteorológica Mundial

En Colombia la región del país que experimenta el mayor impacto del fenómeno ENOS es la región Andina mientras que la Orinoquía y la Amazonía son las menos afectadas. Eventos EN están asociados con la ocurrencia de eventos extremos como sequías, heladas e incendios forestales, mientras que eventos LN se asocia con lluvias torrenciales, inundaciones y deslizamientos (Chaverra et al., 2018; Córdoba-Machado et al., 2015a; Poveda et al., 2006; Poveda et al., 2011; Tedeschi et al., 2015). Gran parte del territorio colombiano es sensible al impacto de la reducción o aumento de la oferta hídrica, lo cual desencadena eventos como inundaciones o sequías que afectan de manera sensible los ecosistemas, la economía y la productividad del país. Según Camilloni et al., (2020), en su estudio de inundaciones y sequías de la Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC), Colombia se encuentra en el puesto 16 del ranking mundial de población expuesta a inundaciones y en el puesto 55 para población expuesta a sequías.

3.1.3 Variables océano-atmosféricas asociadas con la hidroclimatología del suroccidente colombiano

Para obtener predicciones climáticas acertadas, se debe comprender la interacción entre la atmósfera y el océano. El océano es un enorme depósito de calor que condiciona el clima a escala estacional además de provocar variaciones en el clima a largo plazo (Iglesias Fernández, 2010). Por esta razón la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) monitorea las condiciones del océano y la atmósfera proporcionando índices climáticos de gran escala que resumen estas condiciones en los diferentes océanos.

Las variables o índices océano-atmosféricos resultan del monitoreo continuo del medio marino, las cuales son de gran relevancia para mejorar los pronósticos del clima, además detectar efectos de variabilidad y cambio climáticos; así como entender procesos físicos, químicos y biológicos que allí ocurren, y predecir los efectos de las actividades humanas en los ecosistemas marinos (Trinchin et al., 2021). Los principales índices o variables que pueden tener influencia en el suroccidente de Colombia son:

3.1.3.1 Índice de Oscilación del Sur (SOI)

El índice de Oscilación Sur (SOI), es definido como la diferencia estandarizada de las presiones atmosféricas en Tahití (18° LS, 150° LW) y Darwin (12° LS, 131° LE), el cual corresponde al intercambio de masa atmosférica a gran escala entre los hemisferios oriental y occidental en los trópicos. Las anomalías negativas del SOI indican condiciones cálidas (EN) e indica que la presión en Tahití es menor que en Darwin, por su parte, anomalías positivas indican condiciones frías (LN) la cual ocurre cuando la presión en Tahití es superior a la presión en Darwin.

3.1.3.2 Anomalías de la temperatura superficial del Océano Pacífico

La mayoría de los índices de ENOS se basan en las anomalías de la TSM en regiones que han sido definidas para el monitoreo de este fenómeno (Figura 1). La región Niño1+2

fue la primera usada para describir el fenómeno ENOS y corresponde a las anomalías de la TSM en el extremo Este del OPT (0-10S, 90W-80W), la región Niño 3 corresponde a la anomalía de la TSM en el OPT Central (5N-5S, 150W-90W), la región Niño 4 definida por las anomalías de la TSM en el OPT Oriental (5N-5S, 160E-150W) y la región Niño 3.4 la cual corresponde a las anomalías de la TSM entre la región Niño 3 y Niño 4 (-5S-5N, 170W-120W).

3.1.3.3 Índice Oceánico El Niño – ONI

El índice oceánico El Niño corresponde a la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la TSM en la región Niño 3.4. Valores positivos de ONI, mayores a 0.5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento EN, valores inferiores a -0.5 por 5 meses consecutivos indican la ocurrencia de un evento LN. La clasificación de años EN – LN y normales, se hace con el uso de índices macroclimáticos de bases de datos de agencias climáticas como la NOAA. Sin embargo, entre dichos índices macroclimáticos puede haber diferencias en cuanto la consideración sobre la intensidad, la duración, mes de inicio y de terminación de un evento extremo de ENOS.

3.1.3.4 Índice Multivariado ENOS – MEI

El índice MEI es la componente principal sin rotar de seis variables observadas en el OPT: la presión atmosférica a nivel del mar, la componente zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur) de los vientos, la temperatura superficial del océano y del aire, y el porcentaje de nubosidad total del cielo. Los valores positivos del MEI representan la fase cálida de ENOS y los negativos la fase fría. Este índice integra la máxima variabilidad de las condiciones océano-atmosféricas del Pacífico y al compararlo con otros índices de ENOS, el MEI es la variable de mejor correlación con los caudales de cuencas localizadas en las vertientes Pacífico y Andina de la cordillera Occidental de Colombia (Avila Díaz et al., 2014).

3.1.3.5 Oscilación Decadal del Pacífico – PDO

Este índice corresponde a un patrón de variabilidad climática del Océano Pacífico similar al fenómeno ENOS, pero de larga duración que resume las variaciones mensuales de la TSM en el Océano Pacífico Norte desde 20°N hacia el polo. Las anomalías son positivas cuando la temperatura es cálida a lo largo de la Costa del Pacífico, mientras que las anomalías son negativas cuando los patrones de anomalías climáticas se invierten (Maturana et al., 1997).

3.1.3.6 Niño Modoki (EMI)

El Niño Modoki se caracteriza por la aparición de anomalías positivas en la TSM en el centro del Pacífico ecuatorial y de anomalías negativas en el este y el oeste del océano; por su parte La Niña Modoki es la fase opuesta y se caracteriza por una distribución de anomalías de TSM negativas y positivas en estas regiones, respectivamente contrarias a

las que ocurren durante El Niño Modoki (Ashok & Yamagata, 2009). Su estimación contempla tres términos derivados de un promedio de área de anomalías: la región A (165°E-140°W, 10°S-10°N), región B (110°W-70°W, 15°S-5°N) y región C (125°E-145°E, 10°S – 20N) (Weng et al., 2009).

3.1.3.7 Niño Trans (TNI)

El índice Niño Trans (TNI) corresponde a la diferencia de la TSM estandarizada de las regiones Niño 1+2 y Niño 4. El TNI es una medida del gradiente SST estandarizado entre la región Niño 1+2 y Niño 4, ver Figura 1. Este índice es relativamente nuevo, se desarrolló originalmente para caracterizar la evolución de un evento de EN, pero también puede ser útil para fines predictivos (Trenberth & Stepaniak, 2000).

3.2 Oferta hídrica

3.2.1 Definición de oferta hídrica

De acuerdo con Segerer & Villodas (2006), la disponibilidad u oferta hídrica se puede considerar como el agua dulce que aparece en forma de agua superficial y subterránea, en un área específica y en un intervalo de tiempo definido, como componente del ciclo hidrológico de la atmósfera terrestre. Desde un punto de vista científico se pueden observar tres tipos de ofertas, las cuales están definidas por la cantidad de agua que brinda la naturaleza en un lugar dado:

- Oferta potencial de agua: definida por la diferencia entre los valores medios (correspondientes a largos períodos de tiempo) de la precipitación y la evaporación.
- Oferta efectiva de agua: corresponde a la diferencia entre la oferta potencial y el agua que se infiltra, dando como resultado la escorrentía superficial.
- Oferta regulada de agua: referida al agua disponible tras la materialización de obras y/o la adopción de medidas que propendan a lograr la regulación de los volúmenes naturalmente aportados.

La posibilidad de utilización del agua, para una finalidad determinada (demanda), resulta de consideraciones ponderadas de tipo hidrológico, ecológico, técnico y económico, las cuales pueden determinarse así:

- **Disponibilidad hidrológica:** Se determina mediante análisis estocásticos de espacio-tiempo aplicados al ciclo hidrológico (incluyendo las pérdidas derivadas de la utilización del agua), considerando la ecuación del balance hídrico para el ámbito dado, en un lapso definido de tiempo. En forma simplificada se la puede consignar como un volumen total o caudal medio del que puede disponerse, con un determinado rango de seguridad y en un intervalo de tiempo dado (por ejemplo, caudal promedio en m³/s, que con una probabilidad del 80%, pueden aportar los recursos hídricos de la región en 30 días). Cabe observar que esta cantidad varía según la ubicación de dicho período en el año calendario y según el grado de probabilidad establecido.

- **Disponibilidad ecológica:** determinada por la calidad del agua y por el balance entre los efectos que para el ecosistema conlleva la extracción de agua que se efectúa y los beneficios que se derivan de su utilización.
- **Disponibilidad técnica:** resulta de los trabajos y obras de ingeniería requeridos para la captación, conducción y acondicionamiento de las aguas, en ocasiones limitados o condicionados en cuanto a su posibilidad de construcción por razones topográficas, geotécnicas, de materiales de construcción disponibles, entre otras. Estas situaciones pueden variar a medida que la ingeniería va desarrollando nuevas tecnologías para superarlas.
- **Disponibilidad económica:** se caracteriza por la relación existente entre las inversiones totales que deben efectuarse para la materialización de un aprovechamiento y los beneficios que del mismo se esperan obtener.

Del total de agua que constituye la oferta, la cantidad utilizable no es una fracción cuyo valor sea invariable, sino que puede ser modificado a medida que lo hacen los aspectos hidrológicos, ecológicos, económicos y técnicos involucrados. Así un determinado uso que en algún periodo de tiempo no resulta factible o conveniente puede serlo varios años después, o viceversa, si en su momento no se tomó la decisión de ejecutarlo.

Un concepto similar tiene el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual en el Estudio Nacional del Agua 2018, establece que la oferta hídrica depende en gran medida de las condiciones climatológicas, régimen hidrológico, variabilidad natural y características geológicas y de coberturas del área en análisis, y se expresa como la escorrentía superficial. La oferta hídrica se estima para un periodo de tiempo definido, utilizando diversas aproximaciones. Sin embargo, no toda el agua que hace parte de la oferta o escorrentía total puede ser usada por el ser humano, ya que se debe considerar un porcentaje para mantener y conservar los ecosistemas fluviales (caudal ambiental), por lo que adicionalmente debe calcularse un valor de oferta disponible.

La oferta hídrica total superficial (OHTS) es el volumen de agua por unidad de tiempo que escurre por la superficie y que no se infiltra o evapora (IDEAM, 2015). Además, hace parte del agua usada por ecosistemas y usuarios para desarrollar sus actividades vitales y económicas (Falkenmark & Rockström, 2004). La oferta hídrica puede expresarse de varias maneras, como, por ejemplo: i) en volumen (m^3), ii) en escorrentía (mm), que corresponde al volumen que escurre superficialmente, pero expresado en lámina de agua (Chow et al., 1996), y iii) en rendimiento, que es el volumen de agua evacuado por la cuenca en un intervalo de tiempo y en un área específica ($l/s/km^2$), y su valor da un buen indicativo de la cantidad de escorrentía superficial que se da en una cuenca por unidad de área.

3.2.2 Importancia del cálculo de la oferta hídrica y su relación con los fenómenos macroclimáticos de gran escala.

Ropelewski & Halpert (1987) realizaron un análisis sólido que describe los cambios regionales de distribución de la precipitación y la temperatura a escala mundial durante las fases de ENOS a escala mensual y diaria. La investigación realizada por estos

investigadores proporcionó una "metodología consistente para la definición de las regiones geográficas y la fase temporal de la precipitación (1986) y la temperatura (1987) relacionadas con ENOS". Estas investigaciones dieron paso a establecer la coherencia y la magnitud de estos cambios temporales y espaciales. Por ejemplo, cuando el índice ENOS fue positivo (indicando condiciones de EN y aguas más frías sobre el Océano Pacífico ecuatorial occidental), Ropelewski & Halpert (1989) encontraron que se presenta condiciones secas en el norte y el este de Australia. En el estudio de 1989 establecieron los diferentes fenómenos macroclimáticos que se presentan con la variabilidad del índice Oscilación del Sur (SOI) y como estos afectan de forma distinta las regiones influenciadas por este fenómeno.

En Suramérica, Berestovoy (2017) realizó el balance hídrico de la cuenca Mbói Caé (Paraguay) asociado al fenómeno ENOS mediante el sistema HydroBID. Este estudio determinó que el año 2014 fue el año más notable en cuanto a cambios en el balance hídrico relacionado con el aumento en la disponibilidad de agua, siendo uno de los más lluviosos desde 1970. Adicionalmente, encontraron que un volumen importante de agua fluye hacia las aguas subterráneas y superficiales por lo que resulta importante un control y monitoreo de la calidad de esta. El sistema HydroBID resultó en una herramienta adecuada para la planificación de los recursos hídricos, destacando que es adaptable a toda la región y se encuentra disponible a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

El modelo hidrológico HydroBID también fue empleado por Guanoquiza & Alexander (2020) para realizar el plan de gestión de recurso hídrico para una microcuenca interandina de Ecuador). En este estudio se establecieron escenarios asociados a cambio climático, con aumento de la temperatura y reducción de la precipitación, con lo cual concluyeron que: (i) La aplicación de Hydro-BID para modelos hidrológicos en una microcuenca interandina permite implementar medidas de adaptación al cambio climático, (ii) El incremento poblacional resulta ser más influyente en la disponibilidad de agua que poseen las vertientes por tal razón el uso que se le dé es esencial para sostener el sistema de abastecimiento.

Por su parte, Ávila et al., (2014) en Colombia analizó la oferta hídrica de la cuenca interandina del río Cali durante la ocurrencia de eventos extremos asociados al fenómeno ENOS, mediante análisis de correlaciones entre los índices macroclimáticos asociados a este fenómeno y las precipitaciones y caudales mensuales. En ese estudio se estableció que la oferta hídrica decrece en un 40% en épocas del fenómeno EN y aumenta su disponibilidad hasta un 65% en épocas del fenómeno LN. Los resultados obtenidos fueron relevantes en la reducción de la incertidumbre al riesgo de sequías e inundaciones que generalmente ocurren durante las fases extremas del ENOS. Además, estos análisis, aportaron elementos de juicio para la planificación y la gestión de los recursos hídricos, sobre todo lo concerniente a la asignación de concesiones de agua, manejo de crecientes, así como también en aspectos de salubridad y epidemias.

En el Oriente de Colombia, Guevara (2015) determinó la oferta hídrica neta de la microcuenca del Río Upín contemplando escenarios extremos en donde encontró que (i) Del análisis de variabilidad climática se identificaron los eventos extremos, estos

corresponden al año 1985 como evento seco y 1984 húmedo, (ii) Evidenció para el periodo evaluado de 36 años que la variable de precipitación presentó un comportamiento particular durante el año 2014 donde se vincularon dos sucesos extremos opuestos, el primero de lluvias superiores al registro promedio anual del histórico y el segundo de precipitaciones inferiores al promedio anual histórico, infiriendo que estos eventos extremos se pueden presentar en lapsos más cortos de tiempo lo que conlleva a replantear los estudios referentes al cálculo de tiempos de retorno para diferentes fines y (iii) encontraron que las variables de la temperatura máxima y mínima diaria de la estación Apto Vanguardia para el periodo evaluado, han tenido un aumento de 1.49 °C (Tmax) y 0.93°C (Tmin), infiriendo que en la microcuenca del río Upín, esta variable puede aumentar la evapotranspiración ocasionando la reducción de los caudales en los próximos años.

En la Cuenca Alta del Río Bogotá – Colombia, Loaiza (2016), implementó el modelo hidrológico “abcd” formulado por Thomas Jr (1981) para realizar una calibración regional de parámetros con el objetivo de evaluar el impacto del caudal en el área de estudio. Este enfoque se basó en los resultados de downscaling implementado previamente en los modelos de escenarios de Cambio Climático elaborados por la Universidad Nacional para la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Se utilizaron series temporales mensuales de precipitación y temperatura. Aunque la modelación hidrológica presenta limitaciones en términos de la precisión con la que las relaciones funcionales utilizadas representan los procesos que ocurren en la cuenca, así como la disponibilidad de información adecuada para su implementación y aplicación, el modelo "abcd" logró capturar de manera satisfactoria el comportamiento promedio de las series hidrológicas, constituyéndose en un indicador positivo para su posterior aplicación en ejercicios de evaluación hidrológica, especialmente en cuencas donde la información de oferta hídrica es insuficiente.

El modelo de Thomas también fue empleado por Carrillo et al., (2016) en cuencas de Norte de Santander con la regionalización de los parámetros del modelo, con el objeto de estimar la oferta hídrica en cuencas no instrumentalizadas. Utilizaron datos mensuales de precipitación, temperatura y caudal de la red de estaciones del IDEAM. Este estudio se desarrolló en 8 cuencas las cuales se seleccionaron en función del área, densidad de estaciones climatológicas y longitud de registros; las cuales fueron caracterizadas geomorfológicamente con la implementación de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Este estudio determinó que el modelo tiene una buena aplicabilidad ya que la eficiencia de NASH se encontró en un rango de 0.62 a 0.8.

Por su parte, Beltrán (2018) examinó el impacto de las condiciones climáticas y el uso del suelo en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Gachaneca, ubicada en Boyacá, Colombia y su relación con el fenómeno ENOS y la Oscilación Atlántico Norte (OAN) con el fin de proporcionar una base para la gestión integral del recurso hídrico en dicha área. Los resultados obtenidos revelaron que, dentro de la zona de estudio, las variables meteorológicas son influenciadas por la oscilación ENOS y la OAN especialmente durante el periodo comprendido entre diciembre y febrero. Según los valores obtenidos, se pudo concluir que la cuenca experimenta una mayor exposición a eventos de sequía cuando ocurre una fase cálida del ENOS y, al mismo tiempo, la OAN presenta un índice

negativo. Esto se debe a que, bajo estas condiciones, los niveles de precipitación disminuyen, afectando así los caudales de todos los afluentes de la cuenca.

En el Pacífico Colombiano, Canchala et al., (2020c) estudiaron los efectos de los fenómenos oceánicos-atmosféricos en diferentes escalas de tiempo sobre el caudal de la corriente en la cuenca del río Atrato y la cuenca del río Patía. Esta investigación determinó las relaciones de los índices climáticos y la variabilidad de los caudales en las dos cuencas en escalas de tiempo interanual y decenal. Los principales modos de variabilidad del caudal se obtuvieron a partir del análisis de componentes principales y su dependencia lineal con índices de El Niño / Oscilación del Sur (ENSO), precipitación y otros índices se cuantificaron mediante las correlaciones de Pearson y Kendall. Los primeros modos de variabilidad en los caudales de la cuenca del río Atrato y Patía mostraron coincidencias en los valores positivos (negativos) para los períodos 1988-1989, 1998-1999 y 2010-2011 (1997-1998 y 2015-2016) que coincidieron con La Niña-LN (El Niño-EN). A través de este estudio, se comprendió que EN tiende a reducir las precipitaciones y los niveles de los ríos, aumentando las probabilidades de sequía sobre la cuenca del río Atrato y Patía mientras que la LN aumenta las precipitaciones, los niveles de los ríos y la probabilidad de inundaciones.

En el sur del Pacífico Colombiano, Canchala et al., (2020a) reportó correlaciones positivas de la precipitación de la región Pacífico nariñense con T-Niño 1+2 y T-Niño 3, y correlación negativa con la T-Niño 3.4. Adicionalmente Canchala et al., (2020b) utilizando correlaciones de Pearson, encontraron que las precipitaciones en la Región Andina del departamento de Nariño tienen correlaciones negativas con los índices oceánicos ONI, MEI, Niño1+2, Niño3, Niño3.4 y Niño4 y correlaciones positivas con el índice atmosférico SOI en todos los rezagos estudiados, demostrando que existe una relación inversa y persistente con los índices oceánicos, mientras que se registra relación directa con el índice SOI. En contraste, los autores observaron que las precipitaciones en la región Pacífico sincrónicamente están correlacionadas únicamente con el índice Niño3, en el rezago 8 con ONI, y en rezago 9 con Niño1+2, Niño3.4, Niño4 y SOI.

Las anteriores investigaciones permiten evidenciar la importancia de realizar la correlación de los índices climáticos de gran escala con la oferta hídrica, ya que esto permitirá reducir la incertidumbre al riesgo de sequías e inundaciones, y ayudará mediante la planificación del recurso hídrico a implementar medidas de adaptación a la variabilidad climática, ejecutando acciones que garanticen el buen manejo del recurso hídrico teniendo en cuenta que estos eventos extremos tienden a ocurrir con mayor frecuencia e intensidad.

3.3 Descripción de la zona de estudio: Cuenca Río Patía

La cuenca del Río Patía se encuentra localizada entre los departamentos de Cauca y Nariño principalmente (Ver Figura 3), está dividida geográficamente en dos zonas, las CRP y las CRA. Las CRP se encuentra en jurisdicción del departamento de Nariño y abarca todos los afluentes que se encuentran hacia el occidente de la Cordillera Occidental, mientras que las CRA se ubica en los departamentos de Nariño, Cauca y una

pequeña área en Ecuador (nacimiento río Guáitara), en la parte norte de la cuenca está conformada por todos aquellos afluentes del río Patía que se encuentran en los flancos interandinos que rodean el valle alto del río Patía; el cual está ubicado entre los 550 y 1000 msnm rodeado por las cordilleras Centro-Oriental, Central, Occidental y la meseta Popayán (Ramírez Chaves et al., 2010), su principal vertiente es la cordillera Central; por ello los mayores tributarios son los de la margen izquierda. En la parte sur de las CRA el principal afluente es el Río Guáitara, drena toda la cuenca del sur en el altiplano Nariñense (2,500 a 3,000m), bordeado e interrumpido por numerosos conos volcánicos. La cuenca del Juanambú abarca terrenos quebrados, muy disectados (Riascos Muñoz, 2012). Las CRA hasta la Hoz de Minamá es de 13,123 km².

En el departamento del Cauca la cuenca está conformada por los municipios de Balboa, Bolívar, Mercaderes, Patía y Sucre (valle del Patía); Almaguer, La Sierra, La Vega, Rosas, San Sebastián, Sotará y Timbío (Cordillera Central); Florencia y Mercaderes (Cordillera Centro-Oriental); Argelia (Cordillera Occidental). Por su parte, en el departamento de Nariño la cuenca está conformada por los municipios de: La Cruz, San Pablo, la Unión, Colon, San Bernardo, Alban, San Lorenzo, Buesaco, Chachagüí, Pasto, Tangua, Yacuanquer, Funes, Puerres, Córdoba, Potosí, Ipiales, Pupiales, Aldana, Cuaspud, Cumbal, Guachucal, Sapuyes, Tuquerres, Gualmatan, Contadero, Iles, Ospina, Imues, Guaitarilla, Consaca, Ancuya, Linares, Sandoná, La Florida, El Tambo, Los Andes, Taminago, El Rosario, Policarpa, Cumbitara, Leiva, La Ilanada, Samaniego, Los Andes, Ricaurte, Barbacoas, Magui, El Charco, Olaya Herrera, La Tola, Mosquera, Roberto Payan y Francisco Pizarro.

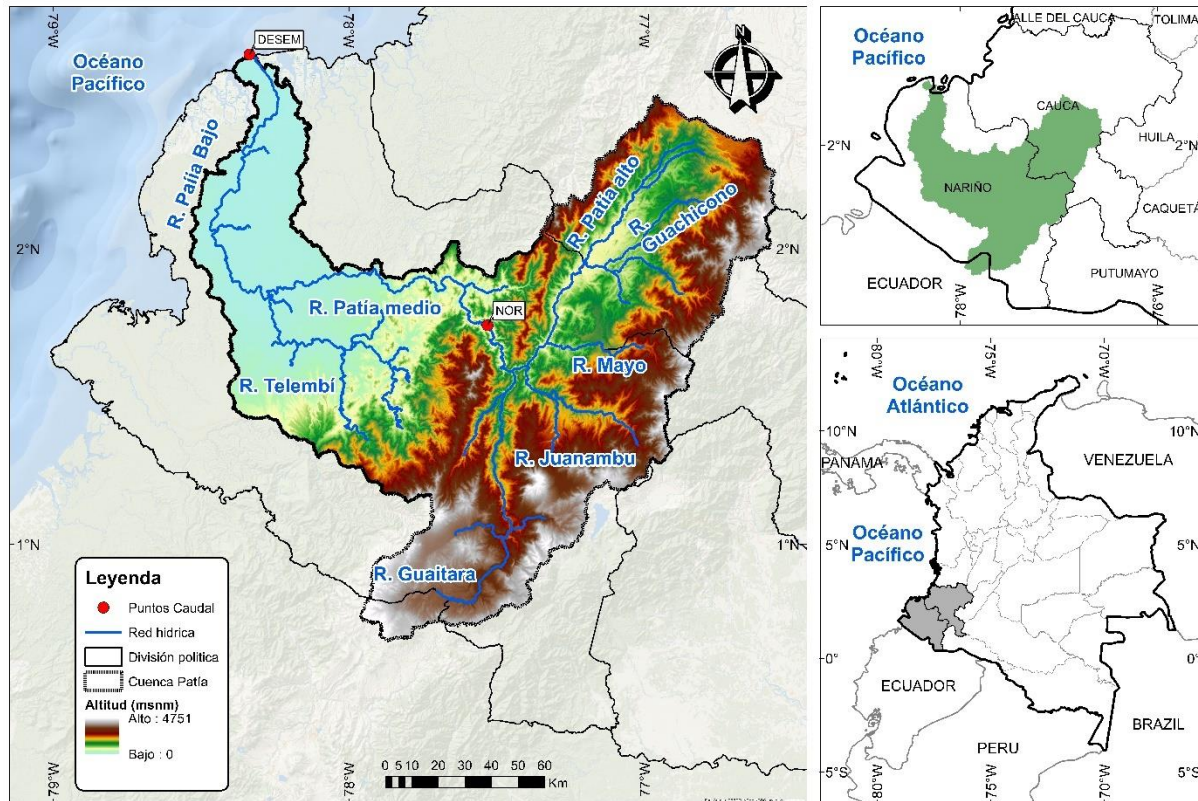


Figura 3. Localización cuenca río Patía, rango de elevación y red hídrica
Fuente: Está investigación

El Río Patía nace en las faldas del Volcán Sotará a 4,580 m de altura como río Timbío y adopta el nombre a partir de la confluencia del río Timbío con el río Quilcasé a 57 km de su origen, a unos 600 m de elevación. Aquí comienza la planicie aluvial del río en un valle, que progresivamente se va ensanchando y profundizando, dejando grandes mesetas y terrazas en varios niveles. Recibe por su margen izquierda ríos grandes como el Guachicono y el Río Mayo, los cuales atraviesan parajes de mesetas y colinas bien disectadas. A 130 km de su origen termina la planicie aluvial y el río penetra en una serie de angostos y profundos cañones a lo largo de 15 km, recibiendo por la margen izquierda los Ríos Juanambú y Guaitara, y penetrar en la Hoz de Minamá a una elevación de 400 m. Esta es un imponente cañón de más de 1 km de profundidad y 60 km de largo, mediante el cual se corta la Cordillera Occidental. El río Patía luego gira al oeste en su curso hacia el Océano Pacífico (Ramírez Chaves et al., 2010).

La cuenca del río Patía abarca una superficie aproximada de 23,000 km² y una longitud de 360 kilómetros. De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua 2014, esta cuenca registra un caudal medio anual en su desembocadura (DESEM) de 1,453 m³/s. La estación hidrológica Los Nortes (NOR) está localizada en el municipio de Cumbitara en el departamento de Nariño; hasta este punto la cuenca del río Patía tiene un área de drenaje de 13,169 km² y un caudal medio anual de 383 m³/s (Velásquez Restrepo & Poveda, 2019). En la Figura 3 se muestran la localización de la cuenca hidrográfica, y la distribución de alturas de la cuenca del río Patía al igual que los puntos de caudal aquí mencionados.

Según Hincapie (2009) “la Subcuenca del alto Patía afloran rocas Paleógenas y Neógenas plegadas y falladas, procedentes de depósitos sedimentarios de las formaciones Esmita, Mosquera y Peña Morada; adicionalmente, hay un gran número de pequeños cuerpos de pórfidos andesíticos y dacíticos, sobre todo en la mitad oriental. Está limitada por fallas regionales inversas y de rumbo. Al interior, muestra fallas inversas del Mioceno Tardío con vergencia occidental. Esta cuenca fue formada por colisión y acreción de terrenos oceánicos al margen occidental de la Placa Sudamericana, durante el Mesozoico y Cenozoico. El alto Patía presenta trampas asociadas a pliegues por propagación de falla”.

Según Parra & Justunico (2013), “en el Pacífico sur los elementos importantes son el domo del Telembí (Serranía de los Gallinazos) y la cuenca tectónica del bajo Patía, la cual está ocupada por sedimentos de edad Cuaternaria delimitados por colinas bajas del Terciario y se pueden resaltar los siguientes aspectos geológicos: A nivel litológico, en las colinas predominan arcillolitas y limolitas grisáceas con intercalaciones de areniscas consideradas del terciario superior y al menos localmente están cubiertas discordantemente por sedimentos con clastos volcánicos dominantes y/o tobas que conforman relieves planos o suavemente disectados considerados del Plio - Pleistoceno; a nivel estructural, las rocas terciarias buzanan hasta 25° y conforman sinclinales y anticlinales suaves, con fallas locales. La parte sur, al este del llamado domo de Telembí, se la considera como una cuenca tectónica mayor, ya que el contacto con el mar ha sido reconocido por diversos autores como un delta”. En la Figura 4 se puede observar el mapa geológico de la cuenca.

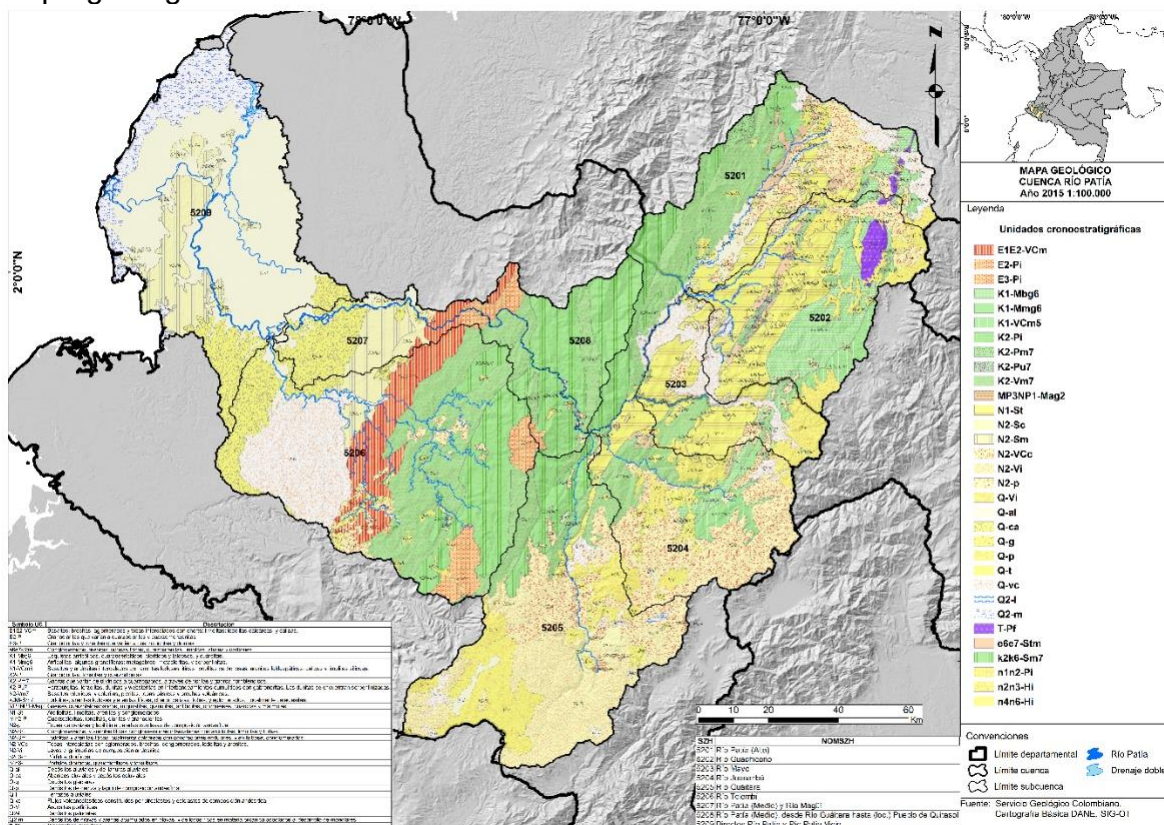


Figura 4. Cuenca río Patía, mapa geológico
Fuente: IGAC 2018

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar la influencia del fenómeno ENOS en sus fases extremas sobre la oferta hídrica mensual en las cuencas región Andina (CRA) y cuencas región Pacífico (CRP) del Río Patía con fines de ordenamiento.

4.2 Objetivos Específicos

1. Estimar la oferta hídrica de la cuenca del Río Patía a partir de la caracterización morfométrica e hidroclimatológica de las CRA y modelación o transposición de caudales para las CRP.
2. Evaluar las teleconexiones entre los índices océano-atmosféricos asociados al fenómeno ENOS y la oferta hídrica en las CRA y CRP del río Patía.

5 METODOLOGÍA

En este capítulo se describen la metodologías aplicadas para alcanzar cada objetivo planteado en esta investigación.

5.1 Objetivo 1

5.1.1 Definición del área de estudio

Esta investigación se desarrolló en la cuenca del Río Patía localizada en el sur del Chocó Biogeográfico Colombiano, la cual cubre parcialmente los departamentos de Cauca y Nariño. El río Patía nace en el departamento del Cauca a los 02°12' de latitud Norte y 77° 00' de longitud Oeste (Ver Figura 3), produce una descarga medial anual de 383 m³/s hasta la estación “los Nortes”, la cual es la última estación hidrométrica IDEAM sobre el río Patía. Para la delimitación del área se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), el cual se extrajo de ASTER GDEM v3 Worldwide Elevation Data (1 arc-second Resolution) para la zona de estudio; este se integró a un SIG para realizar los cálculos de acumulación de flujo, dirección de flujo, pendiente, entre otros, información primordial para la caracterización morfométrica. En la Figura 5 se presentan las 8 subzonas hidrográficas definidas por el IDEAM para la cuenca del río Patía, también se observan la ubicación de las 27 estaciones hidrométricas (ver TABLA 1), además se seleccionaron 14 estaciones pluviométricas (ver Tabla 2) utilizadas en este estudio.

TABLA 1. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS CUENCA RÍO PATÍA

Código	Nombre	Abre	Departa.	Municipio	Río	Szh
52017001	PUERTO NUEVO PATIA	PNP	Nariño	Leiva	Patía Medio	Patía Medio
52017010	PUENTE GUASCAS	PTG	Nariño	Policarpa	Patía Medio	Patía Medio
52017030	LA FONDA	FON	Cauca	Patía (El Bordo)	Mamaconde	Patía Alto
52017070	BOCATOMA SAJANDI	SAJ	Cauca	Patía (El Bordo)	Patía Alto	Patía Alto
52017080	PUENTE CARRETERA	PTC1	Cauca	Balboa (Cauca)	Patía Alto	Patía Alto
52017100	PUENTE CARRETERA	PTC2	Cauca	El Tambo (Cauca)	Timbío	Patía Alto

Tabla 1. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS CUENCA RÍO PATÍA

Código	Nombre	Abre	Departa.	Municipio	Río	Szh
52017110	PUENTE CARRETERA	PTC3	Cauca	El Tambo (Cauca)	Quilcace	Patía Alto
52017120	EL HOYO	HYO	Cauca	Patía (El Bordo)	Qda Hueco Lindo	Patía Alto
52017130	PUENTE COLGANTE TIMBIO	PTT	Cauca	Patía (El Bordo)	Quilcace	Patía Alto
52027010	GUACHICONO	GCH	Cauca	Bolívar (Cauca)	Guachicono	Guachicono
52027020	LA PLAYA	LPY	Cauca	Bolívar (Cauca)	San Jorge	Guachicono
52027030	PUENTE FIERRO	PTF	Cauca	Patía (El Bordo)	Guachicono	Guachicono
52037010	LA CANADA	CAN	Nariño	Colón (Génova)	Mayo	Mayo
52047010	UNIVERSIDAD	UNI	Nariño	Pasto	Pasto	Juanambú
52047020	PUENTE JUANAMBU	PTJ	Nariño	Taminango	Juanambú	Juanambú
52047030	BOCATOMA CENTENARIO	CEN	Nariño	Pasto	Pasto	Juanambú
52047040	PROVIDENCIA	PRV	Nariño	Chachagüí	Pasto	Juanambú
52057010	PILCUAN	PIL	Nariño	Imués	Guáitara	Guáitara
52057030	AGROYACO	AGR	Nariño	Los Andes (Sotomayor)	Guáitara	Guáitara
52057040	CARLOSAMA	CAR	Nariño	Cuaspué (Carlosama)	Blanco	Guáitara
52057050	SAN PEDRO	SPE	Nariño	Linares	Guáitara	Guáitara
52057060	YUNGUILLA	YUN	Nariño	Samaniego	Pascual	Guáitara
52067030	VERGEL	VER	Nariño	Los Andes (Sotomayor)	Telembí	Telembí
52067040	EL SANDE	SND	Nariño	Santa Cruz (Guachavés)	Telembí	Telembí
52077010	PUENTE PUSMEO	PTP	Nariño	Cumbitara	Patía Medio	Patía Medio
52077020	LOS NORTES	NOR	Nariño	Cumbitara	Saspí	Telembí
52067010	SALI	SLI	Nariño	Barbacoas	Patía Bajo	Patía Bajo

Tabla 2. Estaciones pluviométricas consideradas en la cuenca río Patía

Código	Nombre	ID	Departa.	Municipio	Categoría
52060040	VERGEL EL	VER	Nariño	La Llanada	Pluviométrica
52060050	SANDE EL	SDE	Nariño	Santa Cruz (Guachavés)	Pluviométrica
52065020	BARBACOAS	BAR	Nariño	Barbacoas	Pluviométrica
52070010	MAGUI	MAG	Nariño	Magüí (Payán)	Pluviométrica
52090010	SALAHONDA	SHA	Nariño	Francisco Pizarro (Salahonda)	Pluviométrica
52090020	REMOLINO GRANDE	REM	Nariño	Roberto Payán (San José)	Pluviométrica
53010020	MOSQUERA	MOS	Nariño	Mosquera (Nariño)	Pluviométrica
52010040	ROSAS	ROS	Cauca	Rosas	Pluviométrica
52010140	GUASCA LA	GCA	Nariño	Policarpa	Pluviométrica
52025080	ESTRECHO PATIA - AUT	EPT	Cauca	Patía (El Bordo)	Climática Ordinaria
52030030	UNION LA	UNI	Nariño	La Unión (Nariño)	Pluviométrica
52035040	VIENTO LIBRE - AUT	VTL	Nariño	Taminango	Climática Ordinaria
52040160	BERRUECOS	BER	Nariño	Arboleda (Berruecos)	Pluviométrica
52050110	CUMBAL	CUM	Nariño	Cumbal	Pluviométrica

Las estaciones en sombreado (gris) en la Tabla 2 corresponden a las estaciones de las CRP del río Patía las cuales se utilizaron en la estimación de la oferta hídrica de esta región, las 7 estaciones restantes pertenecientes a las CRA del río Patía se utilizaron en la caracterización climática. En la Figura 5 se pueden observar la localización de las estaciones, tanto hidrométricas (simbolizadas con un triángulo de color amarillo), como las estaciones pluviométricas (simbolizadas con un círculo de color rojo).

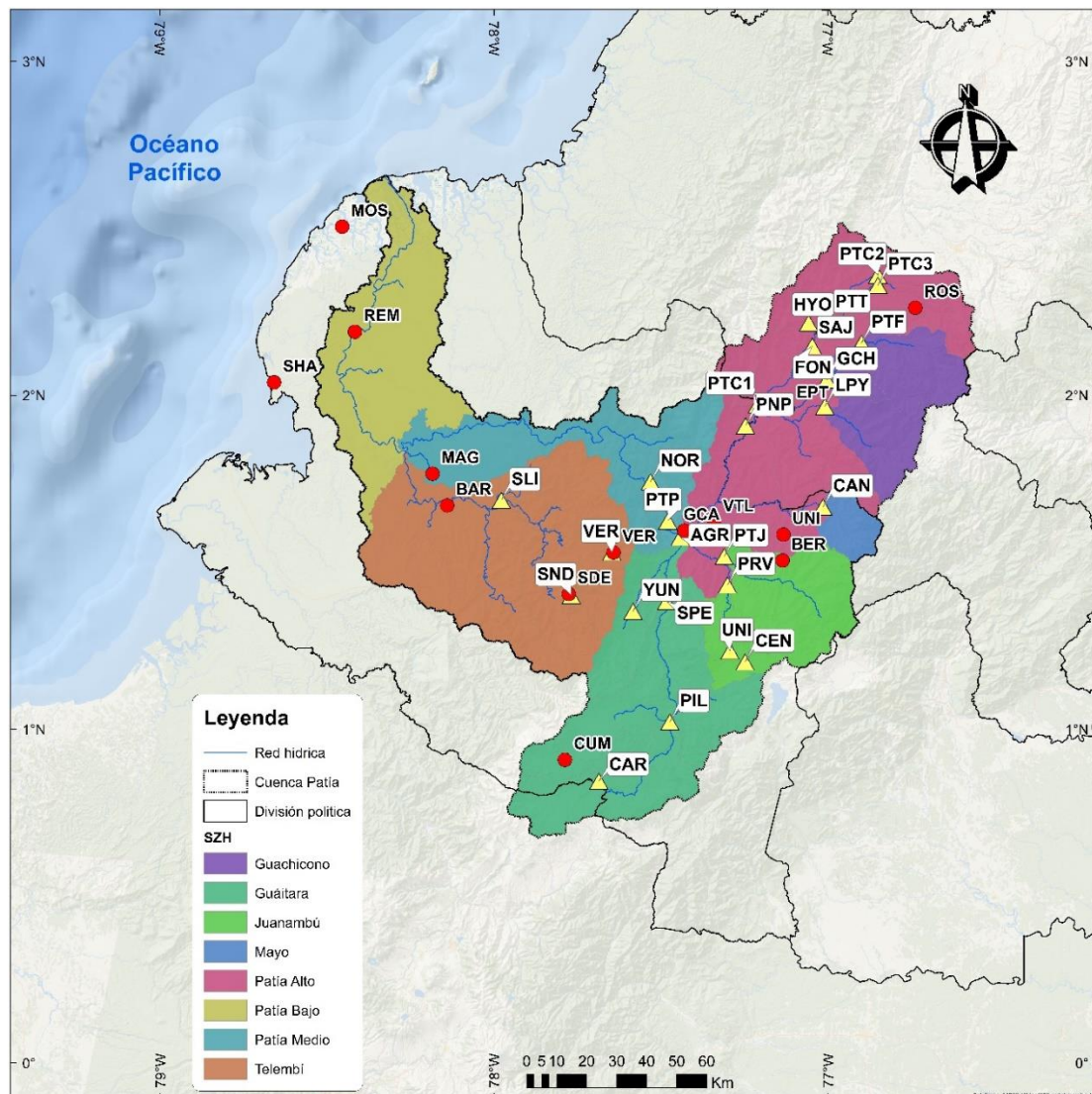


Figura 5. Subzonas hidrográficas cuenca río Patía
Fuente: Esta investigación

5.1.2 Recolección de información

Se recopiló datos de precipitación y caudal mensual de 7 estaciones pluviométricas ubicadas en la zona pacífica y 27 estaciones limnimétricas de toda la cuenca de estudio administradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Los datos recopilados abarcan un periodo de 35 años consecutivos (1984-2018) a los cuales se les realizó un análisis exploratorio y confirmatorio para la selección de estaciones a emplear en esta investigación.

Además, se utilizó información de bases de datos climáticos mundiales para la obtención de los datos de precipitación y temperatura mensual, tales como la base de datos ERA5 implementado por ECMFW (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), que recopila datos de observaciones de globos meteorológicos, de aviones y satelitales desde

el año 1978 reprocesados y analizados para generar reanálisis de datos de precipitación, temperatura, humedad y viento, la resolución de esta información es en grillas de 9 km x 9 km, y datos de CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) elaborada por el CHC (Climate Hazards Center) (Funk et al., 2015) el cual es una alianza de científicos interdisciplinarios y analistas de sequías y seguridad alimentaria que utilizan modelos climáticos y de cultivos, observaciones de la tierra basadas en satélites y conjuntos de datos socioeconómicos para predecir y monitorear las sequías y la escasez de alimentos entre las poblaciones más vulnerables del mundo (Martínez & Serna, 2018). A través de asociaciones con USAID, USGS y FEWS NET, el CHC proporciona una alerta temprana para salvar vidas y asegurar los medios de subsistencia. Esta base de datos de precipitación presenta una resolución espacial de $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ (~5.5 km x ~5.5 km) y resolución temporal (diaria, pentadal, decadal y mensual) desde 1981 (Martínez & Serna, 2018). Para el departamento de Nariño donde se encuentra gran parte del área de la cuenca del río Patía, Ocampo-Marulanda et al., (2022) realizó un análisis comparativo de la información CHIRPS con 46 estaciones in situ de precipitación distribuidas en todo el departamento. Los métodos de validación aplicados en este estudio indicaron que la información satelital de lluvia mensual CHIRPS representa correctamente la lluvia observada y puede ser utilizada en futuros análisis hidroclimáticos para esta zona.

Esta información se utilizó principalmente para la implementación del modelo hidrológico en las cuencas que no se tenía información hidrométrica, como son Telembí, Patía Medio y Patía Bajo. Adicionalmente se complementó con información de publicaciones desarrolladas en esta región del país por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA, de la Universidad del Valle. Finalmente, para el análisis de las correlaciones con índices climáticos del Océano Pacífico Tropical se emplearon los índices publicados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

5.1.3 Caracterización morfométrica

El análisis morfométrico permite interpretar el comportamiento hidrológico y de torrencialidad de una cuenca hidrográfica; por tanto, este análisis se realizó mediante la obtención de índices morfométricos, a partir de la forma de la cuenca, de la red de drenaje y del relieve. La caracterización morfométrica de una cuenca es determinante para un análisis de disponibilidad y/o demanda hídrica, ya que los resultados constituyen un elemento fundamental en la definición de zonas con comportamientos similares a lo largo de la misma; la mayoría de los parámetros morfométricos representan índices adimensionales que permiten comparar las diferentes características de una cuenca, en especial cuando no se cuenta con suficiente información primaria, para establecer cálculos directos de las variables que intervienen (IDEAM, 2019; Londoño, 2001).

El presente estudio buscó determinar las principales características morfométricas y fisiográficas de cada una de las subcuencas determinadas para el análisis del río Patía. Para dicha caracterización, es indispensable contar con dos insumos como (i) la línea divisoria de aguas de la subzona de interés, y (ii) el DEM de la zona de estudio.

Los aspectos básicos que se consideraron para realizar la caracterización morfométrica de las CRA y CRP del río Patía son: área, perímetro y ancho, así como los aspectos generales de longitud, perfil y pendiente de los cauces principales. Además, se considerarán los parámetros de forma, como el índice o coeficiente de Gravelius y factor de forma. Parámetros de relieve como la curva hipsométrica, altitud media ponderada, áreas parciales de elevación, pendiente media de la cuenca y el índice de pendiente. Finalmente, parámetros relacionados a la red hidrográfica como la densidad de drenaje, orden de cauce, relación de bifurcación, frecuencia de los ríos, entre otras.

5.1.3.1 Determinación de las características morfométricas y fisiográficas

La delimitación de cuencas se realizó utilizando el DEM y como punto de cierre la ubicación de la estación hidrométrica correspondiente, posteriormente se realizó la caracterización morfométrica la cual se determinó por medio de herramientas SIG, con el software ArcGIS. Desde su línea divisoria de aguas se determinaron características básicas como el área, el perímetro, la longitud máxima de recorrido, y el ancho (ver Figura 6). Con insumos como la línea divisoria de aguas, el Modelo de Elevación Digital de terreno (DEM) y las ecuaciones de las características descritas en la Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas de (Reyes et al., 2010), se calcularon las características morfométricas y fisiográficas restantes. Estas características fueron recopiladas en una matriz para facilitar la organización de los datos.

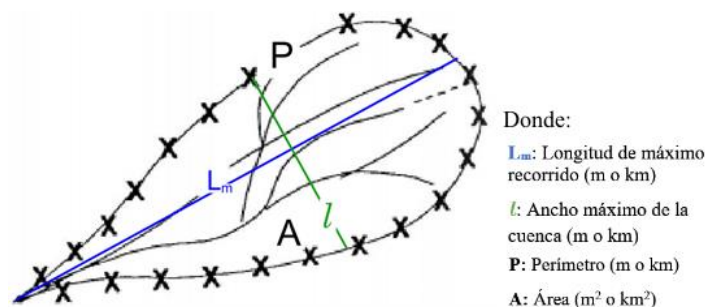


Figura 6. Parámetros morfométricos básicos de una cuenca.
Fuente: Adaptado de (Asensio et al., 2006)

A continuación, en la Tabla 3 se describen en detalle las características morfométricas básicas presentadas en la Figura 6.

Tabla 3. Características morfométricas básicas de una cuenca.

Característica	Descripción
Área (A) o superficie	Es la proyección ortogonal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido-directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en km^2 o m^2 (Lux Cardona, 2016). Dependiendo del tamaño relativo en km^2 de las superficies hidrológicas, se les denomina (sin ser algo rígido estos términos), los nombres de sector (5 - 20), microcuenca (20 – 100), subcuenca (100 – 300), y cuenca (> 300) (Jiménez & Materón, 1986; citado por (Reyes et al., 2010)).
Perímetro (P)	Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre el parteaguas o línea divisoria de aguas. Se expresa normalmente en metros o kilómetros

Tabla 3. Características morfométricas básicas de una cuenca.

Característica	Descripción
Longitud (L_m o L)	Es la longitud máxima de recorrido, que se define como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto ubicado al extremo contrario más lejano del primero ubicado, cortando la línea de contorno de la cuenca (Asensio et al., 2006)
Ancho máximo (l o W)	Se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) $l = \frac{A}{L}$ (1) (Asensio et al., 2006).

5.1.3.2 Índices y coeficientes de Forma

Las características morfométricas tratan de cuantificar por medio de índices y/o coeficientes el movimiento del agua y el cómo responde la cuenca a tal movimiento. De tal manera, estos parámetros son un referente para determinar la dinámica esperada de la escorrentía superficial dentro de la cuenca. La forma de la cuenca determina la respuesta del flujo de agua, lo cual se puede apreciar por medio de hidrógrafas. En la Figura 7 se observan tres hidrógrafas con distinta forma, pero con igual área y lámina precipitada. Jiménez (1992) y Reyes (2010) mencionan que aquellas cuencas con ríos extensos en su longitud, se facilita el amortiguamiento o la reducción a los efectos de una creciente, pues se aumenta el tiempo de su formación y se reduce el caudal máximo o pico de esta. Por el contrario, para aquellas cuencas con ríos poco extensos en longitud, las avenidas ante eventos de alguna pluviosidad serán más fácil de registrarse.

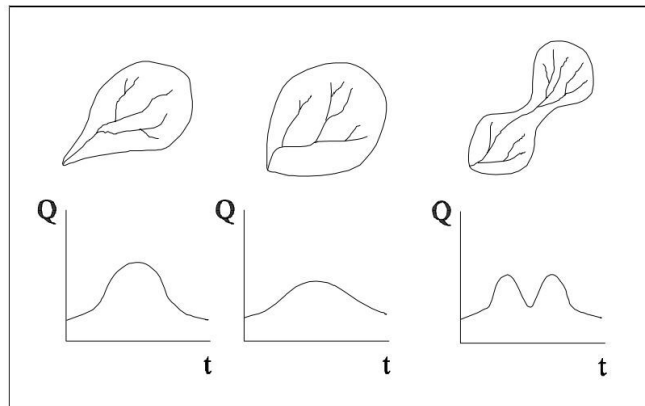


Figura 7. Hidrógrafas para cuencas con misma área y forma diferente.
Fuente: (Guerrero, 2002)

En la Tabla 4 se resumen las expresiones de cálculo para los principales índices y coeficientes de forma, los cuales se describen a continuación.

Tabla 4. Resumen de índices y coeficientes de forma para clasificación de cuencas.

PARÁMETRO	ECUACIÓN	INTERPRETACIÓN
Índice de compacidad (K_c)	$K_c = 0,28 * \left[\frac{P}{\sqrt{A}} \right]$ (2)	$1.00 < K_c < 1.25$: Cuenca redonda a oval redonda. $1.25 < K_c < 1.50$: Cuenca de oval redonda a oval oblonga. $1.50 < K_c < 1.75$: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga.

Tabla 4. Resumen de índices y coeficientes de forma para clasificación de cuencas.

PARÁMETRO	ECUACIÓN	INTERPRETACIÓN
Factor de forma (F)	$F = \frac{A}{L_m^2}$ (3)	F > 1: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas. F < 1: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas.
Índice de alargamiento (l_a)	$l_a = \frac{L_m}{l}$ (4)	$l_a > 1$: Cuenca alargada $l_a \approx 1$: Cuenca achatada y por lo tanto el cauce principal es corto.
Índice asimétrico (I_{as})	$I_{as} = \frac{A_{may}}{A_{men}}$ (5)	$I_{as} > 1$: Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes. $I_{as} \approx 1$: Distribución uniforme del Cauce principal.

5.1.3.3 Pendiente media de la cuenca (S)

La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, de tal manera que es estimada con base en un plano topográfico que contenga curvas de nivel con igual desnivel entre ellas, empleando alguno de los métodos como el de Alvord y el de Horton.

El comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas de suelo (erosión o sedimentación), depende directamente de la pendiente de esta, por lo que su determinación es importante para determinar posibles problemas de erosión en zonas con altas pendientes, o problemas de drenaje y sedimentación en zonas con pendientes bajas. También tiene influencia en la red de drenaje de la cuenca, pues afecta directamente el escurrimiento de las aguas lluvias; esto es, en la magnitud y en el tiempo de formación de una creciente en el cauce principal. Las cuencas también reciben una clasificación acorde con su pendiente, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación del relieve de las cuencas de acuerdo con la pendiente media

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE RELIEVE	SÍMBOLO
0 - 3	Plano	P ₁
3 - 7	Suave	P ₂
7 - 12	Medianamente Accidentado	P ₃
12 - 20	Accidentado	P ₄
20 - 35	Fuertemente Accidentado	P ₅
35 - 50	Muy Fuertemente Accidentado	P ₆
50 - 75	Escarpado	P ₇
>75	Muy Escarpado	P ₈

Fuente: (Reyes et al., 2010)

A continuación, la Figura 8 describe la metodología a emplear para el cálculo de la pendiente media por el método de Alvord.

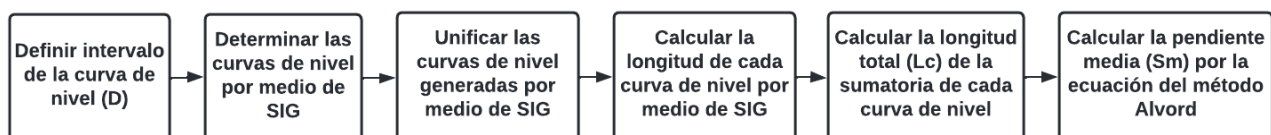


Figura 8. Metodología para el cálculo de la pendiente media de la cuenca por medio del método de Alvord.

5.1.3.4 Elevación de la cuenca

La elevación de la cuenca es la variación altitudinal presente a lo largo de la cuenca hidrográfica, que incide directamente sobre el clima y por tanto sobre el régimen hidrológico, además de brindar una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas características dentro de la misma cuenca (Reyes et al., 2010). Esto se puede describir por medio de la función o curva hipsométrica, que es la representación gráfica del relieve de la cuenca en función de las superficies correspondientes.

Algunas elevaciones destacables en la cuenca para el respectivo cálculo de otros parámetros son la Elevación mínima ($E_{\min}$), Elevación máxima ($E_{\max}$), Elevación media (E_m).

5.1.3.4.1 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es un gráfico que muestra la relación entre la elevación y la superficie relativa en una cuenca hidrográfica. Esta representación visual proporciona información precisa sobre el patrón general de altitudes en la cuenca y la dinámica del ciclo erosivo. Los datos de elevación son fundamentales en esta representación, ya que permiten determinar si una cuenca es joven o vieja, revelando así aspectos importantes sobre su evolución geológica (Guerra & González, 2002). En la Figura 9 se describe la metodología para la construcción de las curvas hipsométrica y en la Figura 10 se visualiza la clasificación según (Strahler, 1952).

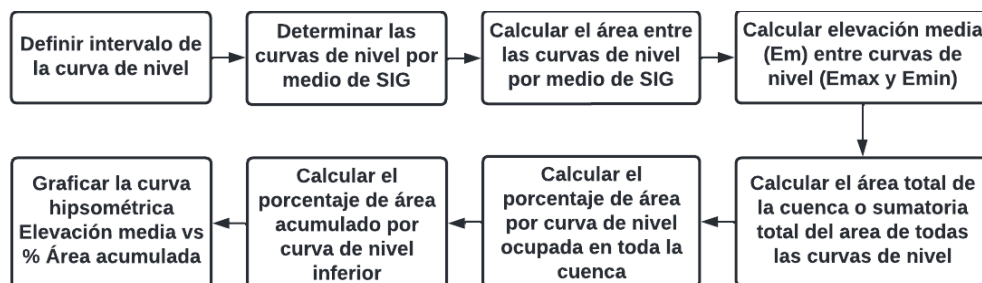
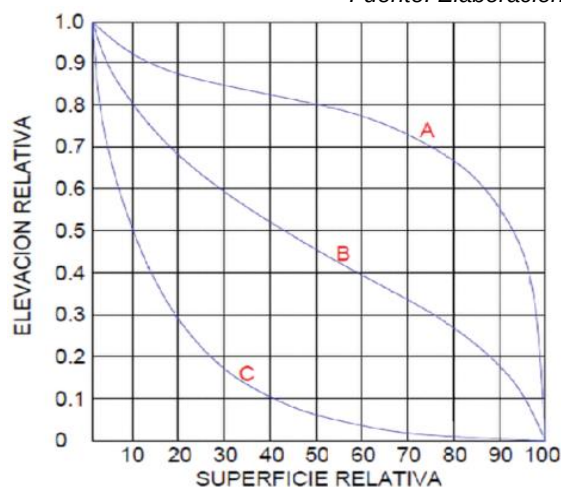


Figura 9. Metodología para la construcción de la curva hipsométrica.
Fuente: Elaboración propia.



A: Fase de juventud
B: Fase de madurez
C: Fase de Vejez

Figura 10. Curva hipsométrica característica del ciclo erosivo
Fuente: Adaptado de (Strahler, 1952)

5.1.3.4.2 Elevación media de la cuenca (E_m)

La elevación media es aquella que determina la cota de la curva de nivel que divide la cuenca en dos zonas de igual área; es decir, la elevación correspondiente al 50% del área total. Su determinación se hace también partiendo de un plano topográfico empleando el método de las cuadrículas o el método área-elevación para lo cual es necesario construir la curva hipsométrica. El método de área-elevación, es similar al método como se construye la curva hipsométrica. En la Figura 11 se describe la metodología para su estimación.

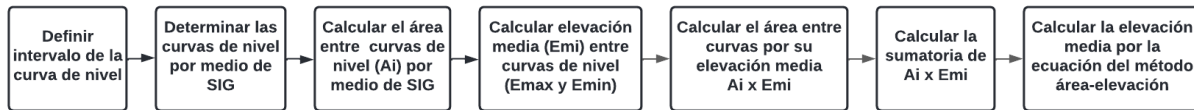


Figura 11. Metodología para el cálculo de la elevación media por el método de área-elevación.
Fuente: Elaboración propia.

Otros parámetros o coeficientes propios para la interpretación de la elevación media de la cuenca son el coeficiente de masividad, que permite diferenciar cuencas de igual altura media, pero de relieve distinto, y el coeficiente orográfico, el cual expresa el potencial de degradación de la cuenca. En la Tabla 6 se presentan las ecuaciones empleadas por distintos métodos para el cálculo de la pendiente y elevación media de una cuenca junto con los coeficientes mencionados con anterioridad.

Tabla 6. Características con respecto al relieve de la cuenca

PARÁMETRO		ECUACIÓN	INTERPRETACIÓN
Pendiente media (S_m)	Método de Alvord	$S_m = \frac{D \cdot L_c}{A_t} \quad (6)$	-
Elevación media (E_m)	Método área – elevación	$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot e_i}{A_t} \quad (7)$	-
Coeficiente de masividad (km)		$K_m = \frac{E_m}{A} \quad (8)$	$0 < K_m < 35$: Moderadamente montañosa. $35 < K_m < 70$: Montañosa. $70 < K_m < 105$: Muy montañosa.
Coeficiente orográfico (C_o)		$C_o = \frac{E_m^2}{A} \quad (9)$	$C_o > 6$: Es un relieve accidentado. $C_o < 6$: Es un relieve poco accidentado.

Fuente: Adaptado de (Reyes et al., 2010)

5.1.3.5 Red de drenaje

La red de drenaje de una cuenca hidrográfica está conformada por el cauce principal y sus tributarios, por lo que está relacionada con el movimiento del agua dentro de la cuenca. Los cauces, drenajes o corrientes de agua pueden clasificarse de distintas formas, como (i) según la constancia en la escorrentía o transporte de caudal, encontrándose cauces perennes, intermitentes y efímeros; y (ii) según su forma relacionándose con su influencia en la pendiente de la cuenca, clasificándose como cauces semirrectos, trenzados y meándricos. Por otro lado, se pueden encontrar distintos

tipos de patrones de red de drenaje acorde con las características geomorfológicas que les han dado origen. Pueden encontrarse patrones dendríticos, rectangulares, angulado, radial, paralelo, entre otros. Algunas características morfométricas de la red de drenaje de una cuenca se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de la red de drenaje de una cuenca.

Característica	Descripción
Longitud del cauce principal (L_c)	Es la distancia horizontal del río principal, desde su nacimiento hasta el punto de cierre o de concentración, dentro de los límites de la cuenca. Se calcula por medio de SIG teniendo como base el cauce principal de la cuenca.
Perfil longitudinal del río	Es un gráfico que representa las distintas elevaciones del fondo del río desde su nacimiento hasta la desembocadura de la cuenca. Se construye por medio de SIG teniendo como base (i) el cauce principal y (ii) el DEM de la cuenca.
longitud total de la red de drenaje ($\sum L_i$)	Es la sumatoria de las corrientes perennes y las intermitentes, incluyendo los cauces efímeros, es decir, aquellos que sólo llevan agua durante las lluvias. Se calcula por medio de SIG teniendo como base la red de drenaje de la cuenca.
Número de orden (n)	Es una clasificación donde se le da un determinado valor a los diferentes cauces de acuerdo con su grado de bifurcación. Van desde el primer orden, siendo aquellas corrientes portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. En general, dos ríos de orden “n” dan lugar a uno de orden $n+1$. Para la determinación del orden de cada corriente, fue utilizado el Método de Horton-Strahler, y se determinó por medio de SIG teniendo como base el DEM y la línea divisoria de aguas para la generación de la red de drenaje de la cuenca.
Densidad del drenaje (D_d)	Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de una cuenca y su área total; permite tener un conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. Cuanto mayor sea la densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.
Constante de estabilidad del río (C)	Es el valor inverso de la densidad de drenaje. Representa, físicamente, la superficie de cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Se considera como una medida de la erodabilidad de la cuenca.
Índice de torrencialidad (C_T)	Este índice es utilizado para definir el carácter torrencial de una cuenca, de manera que relaciona el número de corrientes de primer orden (método Horton) y el área total de la cuenca. Un comportamiento torrencial refiere a una corriente o avenida impetuosa de aguas que sobreviene en tiempos de muchas lluvias.
Pendiente del cauce (S)	Es un factor importante al incidir en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, relacionándose directamente con la velocidad del agua. Para su cálculo existen métodos como el de las elevaciones extremas, y el de Taylor – Schwarz. La pendiente media del cauce (S) por medio del método de Taylor – Schwarz fue calculada por medio de SIG teniendo como base (i) el cauce principal y (ii) el DEM de la cuenca.
Tiempo de concentración (T_c)	Es el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida de interés la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca.
Sinuosidad del cauce (Sin)	Es un indicativo del régimen del cauce principal. Es la longitud total del cauce principal (L), considerando sus curvas y recodos, y la longitud del valle del cauce principal medida sobre un trazado suave del cauce (L_s). Este trazado suave se construyó por medio de SIG.

Fuente: Adaptado de (Reyes et al., 2010)

A continuación, en la Tabla 8 se presentan las ecuaciones empleadas para el cálculo de las características morfométricas de la red de drenaje previamente descritas, donde también se presentan las interpretaciones de sus valores.

Tabla 8. Características morfométricas de la red de drenaje de una cuenca.

PARÁMETRO	ECUACIÓN	INTERPRETACIÓN
Densidad del drenaje - Método de Horton (D_d)	$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (10)$	$D_d \leq 0.75$ o D_d Red mal drenada $0.75 < D_d < 3.5$ Red medianamente drenada $D_d \geq 3.5$ o D_d Red muy bien drenada
Constante de estabilidad del río (C)	$C = \frac{A}{\sum L_i} \quad (11)$	$\uparrow C$: $\downarrow D_d$: $\downarrow$ Erodabilidad $\downarrow C$: $\uparrow D_d$: $\uparrow$ Erodabilidad
Índice de torrencialidad (C_T)	$C_T = \frac{n_i}{A} \quad (12)$	
Método elevaciones extremas		Método de Taylor - Schwarz
Pendiente del cauce (S)	$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \times 100 \quad (13)$	$S = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2 \quad (14)$
Tiempo de concentración Método de Kirpich (T_c)	$T_c = \frac{0,01947 \times L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (15)$	
Sinuosidad del cauce (Sin)	$Sin = \frac{L}{L_s} \quad (16)$	$Sin \leq 1.25$: río con alineamiento recto

Fuente: Adaptado de (Reyes et al., 2010)

5.1.3.6 Cálculo del tiempo de concentración

El tiempo de concentración T_c dado en horas, es el tiempo de viaje de una gota de lluvia desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de desagüe. Las expresiones más comunes para su estimación son de tipo empírico y cada una de ellas ha sido desarrollada para una zona en particular (Ibáñez et al., 2011; Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011). En la Tabla 9 se muestran las ecuaciones usadas para la estimación del tiempo de concentración.

Tabla 9. Formulas empleadas para el cálculo del T_c

METODO	FÓRMULA	UNIDADES DE LAS VARIABLES
Temez	$T_c = 0,3 * (L / S_o^{0,25})^{0,76} \quad (17)$	L (km) S_o (m/m)
U.S.B.R	$T_c = 0,066 * (L / S_o^{0,5})^{0,77} \quad (18)$	L (km) S_o (m/m)
Clark	$T_c = 0,335 (A / S_o^{0,5})^{0,593} \quad (19)$	A (km ²) S_o (m/m)
Giandotti	$T_c = (4A^{0,5} + 1.5L) / (25,3 (S_o L)^{0,5}) \quad (20)$	L (km) A (Km ²) S_o (m/m)
Kirpich	$T_c = 0,0662 (L^{0,77} / S_o^{0,385}) \quad (21)$	L (km) S_o (m/m)
California Culvert Practice	$T_c = (162,63 L^3 / H)^{0,385} \quad (22)$	L (km) H (m)
Passini	$T_c = 0,108 (A L)^{1/3} / S_o^{0,5} \quad (23)$	L (km) A (Km ²) S_o (m/m)

Fuente: Adaptado de (Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011)

El tiempo de concentración adoptado corresponde al promedio de todas las metodologías eliminando los datos extremos (máximos y mínimos).

5.1.3.7 Optimización del cálculo de características morfométricas y fisiográficas

La metodología tradicional de hoy día es determinar las características morfométricas y fisiográficas basándose en SIG utilizando sus distintas herramientas de geoprocésamiento. Para el presente estudio se trabajó con un total de 30 subzonas hidrográficas, 27 de estaciones hidrométricas y 3 adicionales de las zonas sin estación donde se estimó la oferta hídrica. A todas las cuencas se le calcularon todas las características morfométricas y fisiográficas previamente descritas. Debido a la cantidad de información que se manejó, se propuso optimizar las metodologías que requerían uso del software ArcGIS como Sistema de Información Geográfica. Esto fue posible al conocer la sintaxis del lenguaje de programación que maneja el software, que es Python. Es así como la sintaxis requerida por ArcGIS, requiere de algunos parámetros base como (i) la librería denominada “arcpy”, (ii) la herramienta de geoprocésamiento a utilizar, que puede ser de campos, análisis espacial, administración de datos, entre otros; esta herramienta ayudo a definir los campos necesarios a llenar dentro la línea de código, (iii) un archivo o función de entrada, (iv) un archivo o función de salida, (v) un campo de una tabla por la que se requiere la herramienta, (vi) una función de cálculo, (vii) un parámetro específico de distancia, área, tolerancia, etc., (viii) un archivo DEM de entrada; entre otros parámetros o insumos más que resultan de utilidad para realizar determinada operación con las herramientas de geoprocésamiento que ofrece ArcGIS (Alfonso et al., 2022).

Para el presente estudio se desarrolló un código que permite calcular ciertas características morfométricas y fisiográficas, cambiando parámetros como el nombre de la cuenca, el archivo de interés, la longitud o distancia de interés, entre otros. En el código se encuentra recopilado la sintaxis que requiere (i) el conjunto de herramientas de campos de una tabla, de manera que sea posible añadir, calcular, borrar, etc., algún campo de la capa de la línea divisoria de aguas de una cuenca, como puede ser el área o el perímetro; (ii) herramientas de análisis – extraer, al poder generar un buffer de un polígono inicial, o querer recortar algo específico basado en una determinada capa; (iii) herramientas de administración de datos, al querer disolver curvas de nivel generadas, o dividir líneas según puntos establecidos en el espacio; (iv) herramientas de análisis espacial, al querer determinar el área del polígono que forman las curvas de nivel, o al determinar la longitud total de las líneas generadas en las curvas de nivel, entre otros.

5.1.4 Tratamiento de datos hidrometeorológicos

Para esta actividad se recopiló, clasificó, analizó e interpretó la información secundaria de datos climáticos, pluviométricos e hidrométricos disponibles en la zona de estudio para un periodo de 35 años (1984-2018), estos datos fueron principalmente de las estaciones del IDEAM a escala mensual.

Inicialmente se desarrolló un análisis exploratorio de los datos de las 27 estaciones hidrométricas que opera el IDEAM, instaladas dentro de la Cuenca del Río Patía, con el fin de determinar cambios o tendencias en las series, ya que el uso de la información sin previa evaluación de su estructura, consistencia, homogeneidad, entre otros, constituye un enfoque de caja negra que incrementa el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos (Lobo, 2004). También se analizaron 7 estaciones pluviométrica ubicadas en la CBRP, ya que estas se utilizarán para determinar la oferta hídrica de esta zona de la cuenca.

En las series temporales se detectaron datos faltantes los cuales fueron completados con el Análisis de Componentes principales no lineales (NLPCA - Por sus siglas en inglés), propuesto por Scholz et al., (2005) y aplicado en la imputación de datos climatológicos por Miró et al., (2017), y en datos de precipitación y caudales por Canchala et al., (2019).

5.1.4.1 Determinación de consistencia y homogeneidad

La finalidad de un análisis de homogeneidad es descubrir tendencias en la media y la varianza de las series. Para lo cual se realizan una serie de pruebas que ayudan a establecer si las series temporales preservan sus propiedades estadísticas durante el periodo de estudio, o por el contrario encontrar cambios estadísticamente significativos. Es importante destacar los cambios o tendencias en los datos ya que comprender el comportamiento de estos es fundamental para la toma de decisiones (Guajardo-Panes et al., 2017).

Para el desarrollo de las pruebas que se aplican a los datos propuestos se genera la hipótesis nula H_0 , que establece la tendencia constante de los datos hasta que una función estadística de prueba demuestre lo contrario (Medina & Galván, 2007).

A continuación, se describen las diferentes pruebas estadísticas que se realizaron con los datos para obtener el criterio de decisión en cuanto a la hipótesis que detecta la homogeneidad y consistencia de las series temporales tanto de caudal como precipitación. Cabe resaltar que los cálculos se realizan con la ayuda del software Excel y el software estadístico R. El conocimiento sobre las definiciones y fórmulas matemáticas descritas a continuación se basan en los siguientes autores Dekking et al., (2005); Montgomery & Runger, (2020) y Salas et al., (2002).

5.1.4.1.1 Prueba T

Este estadístico de prueba se encarga de identificar saltos en la media, asumiendo que los datos tienen una distribución normal (Gómez et al., 2013). Mediante las operaciones que se realizan con la información se pretende encontrar la probabilidad de que ocurra el estadístico, con ayuda del nivel de significancia establecido y el estadístico crítico se decide si se rechaza o no la H_0 .

$$T_c = \left| \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \right| \quad (24)$$

N=Número de datos

r=Coeficiente de correlación cruzada de orden 0, entre la serie $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ y el orden de la serie $(1, 2, 3, \dots, n)$

La hipótesis H_0 se rechaza si $T_c > (T_{1-\alpha/2}, v)$

Cuantil $(1-\alpha/2)$ de la distribución t-student, con $v = N-2$, grados de libertad

5.1.4.1.2 Cambios en la Media

Se establece que la media puede tener un cambio en algún momento de la serie temporal, para probar esta hipótesis se realizan 3 diferentes tipos de prueba:

- **Prueba T:** Es una prueba paramétrica que asume una distribución normal de los datos. Para proceder a aplicar la misma se divide la serie estableciendo un punto de cambio y con esta prueba se pretende probar que los subconjuntos de la serie poseen una misma media, además los mismos deben tener la misma desviación.

$$T_c = \frac{|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2|}{S \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (25)$$

$$S = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)\hat{\sigma}_1^2 + (N_2 - 1)\hat{\sigma}_2^2}{N - 2}} \quad (26)$$

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ contra $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

La H_0 se rechaza con un nivel de significancia α si: $T_c > T_{1-\alpha/2} (N-2)$

- **Mann Whitney:** Esta prueba no asume ningún tipo de distribución en la información, de manera análoga a la prueba T, se subdivide la serie en 2 partes estableciendo un punto de cambio mediante el cual se asume hipotéticamente que ambos conjuntos de datos poseen la misma media, la prueba establece que los dos grupos de datos tienen la misma distribución.

$$U_c = \frac{\sum_{t=1}^{N_1} R(y_t) - N_1 \left(\frac{N_1 + N_2 + 1}{2} \right)}{\sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}}} \quad (27)$$

Prueba No-Paramétrica: No asume ninguna distribución de los datos a priori

Método basado en los órdenes de los datos para una serie dada

$(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$

obtenemos 2 subconjuntos

$(y_1, y_2, y_3, \dots, y_{t1})$

$(y_{t1}, \dots, y_n)$

La prueba asume que ambos subconjuntos se distribuyen con la misma función, pero de parámetros diferentes

$H_0: \mu_1 = \mu_2$

La media de la primera subserie es igual a la media de la segunda subserie

- **Abbe (Homog):** se calcula la desviación de cada uno de los datos con respecto a la media, lo cual se define como una nueva variable “z”, la cual se describe a continuación:

Para una serie dada, $Y_1, Y_2, \dots, y_n$

$$Z_t = y_t - \hat{\mu}_y \quad (28)$$

Se definen dos constantes: A y B

$$A = \sum_{t=1}^N z_t^2 \quad B = (z_N - z_1)^2 + \sum_{t=1}^{N-1} (z_t - z_{t+1})^2 \quad (29)$$

El estadístico de Abbe se define como:

$$T_c = \frac{2A}{B}$$

H_0 : No hay cambio en la media

H_0 se rechaza si cae fuera del intervalo

$$\left[1 - \sqrt{\frac{1}{N}}, 1 + \sqrt{\frac{1}{N}} \right] \quad (30)$$

5.1.4.2 Cambio Varianza prueba F

Esta prueba se usa para detectar cambios en la varianza de la serie temporal, mediante el cociente de la varianza entre dos subconjuntos de los datos.

Prueba paramétrica: Asume distribución normal de los datos a priori.

Para una serie dada ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$), obtenemos dos subconjuntos

($y_1, y_2, y_3, \dots, y_{t1}$) Se asume que tiene media μ_1 y varianza σ_1^2

($y_{t1}, \dots, y_n$) Se asume que tiene media μ_2 y varianza σ_2^2

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ contra $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

El estadístico para esta prueba se define como:

$$F_c = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2} \quad (31)$$

H_0 no se rechaza si $F_{1-\alpha/2}(N_1-1, N-N_1-1) \leq F_c \leq F_{\alpha/2}(N_1-1, N-N_1-1)$

5.1.4.3 Desarrollo de análisis de tendencia, pendiente y puntos de quiebre en las series temporales.

Por medio del software estadístico R, se realizaron las pruebas que establecen con precisión la tendencia, pendiente y puntos de quiebre de los datos analizados, con el fin de evaluar su comportamiento para el periodo de análisis establecido. A continuación, se describen las pruebas aplicadas.

5.1.4.3.1 Prueba de tendencia de Mann-Kendall

Esta prueba básicamente se encarga de detectar la tendencia de crecimiento o decrecimiento en series de datos climatológicos, decretando una hipótesis de estabilidad la cual debe conservar la serie, o por el contrario establecer que no se encuentra una tendencia, procedimiento establecidos por (Kendall, 2022; Kendall, 1948; Mann, 1945)

Esta prueba compara todos los pares de datos, identifica si una variable va creciendo o decreciendo desde cualquier punto de la muestra.

La prueba No identifica el tipo de tendencia, pero no presume que es lineal, ya que cuenta el número de incrementos y resta el número de disminuciones.

H_0 : No hay tendencia

Al compara cada par de datos se le asigna una calificación, si la diferencia es positiva, negativa o nula

Si $(X_i - X_j) > 0 \rightarrow 1$

Si $(X_i - X_j) < 0 \rightarrow -1$

Si $(X_i - X_j) = 0 \rightarrow 0$

Con estas calificaciones se obtiene el estadístico “S”, definido como:

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^N y_t \quad (32)$$

Se transforma es estadístico S en Z:

$$Z = \frac{S - m}{\sqrt{V(S)}} \quad (33)$$

Si $(S) > 0 \rightarrow m=1$

Si $(S) < 0 \rightarrow m=-1$

Si $(S) = 0 \rightarrow m=0$

Algunos autores definen que:

$$V(S) = \frac{1}{18} [N(N-1)(2N+5)] \quad (34)$$

Se escoge el nivel de significancia “ α ” ($\alpha=0.05$)

El estadístico Z, se asume que tiene una distribución N (0,1) (proviene de una suma). Por lo tanto, se determina el cuantil $U_{1-\alpha/2}$, de la distribución Normal estándar, el cual finalmente se compara con el valor absoluto de Z.

El criterio de decisión establece que la H_0 se rechaza si $|Z| > U_{1-\alpha/2}$

5.1.4.3.2 Pendiente de Sen

La pendiente de Sen se usa para cuantificar la tendencia encontrada en la prueba de Mann Kendall, se asume que dicha propensión de los datos es lineal. Se realiza calculando las pendientes entre pares de datos, se operan estos resultados encontrando la mediana entre los mismos, dicho valor será la tendencia encontrada (Sen, 1968).

5.1.4.3.3 Prueba de Pettitt

Esta prueba se usa para detectar el punto de cambio en la serie temporal, y que esta proporcionará el año del punto de ruptura en las series de tiempo analizadas (Pettitt, 1979).

Prueba de significancia estadística para puntos de cambio

No paramétrica

En cada punto t, realiza la prueba $F(x_1-t)=F(x_t-n)$

Si las funciones de distribución de los datos antes y después del corte son iguales $\rightarrow$ no hay cambio

Si las funciones de distribución de los datos antes y después del corte son diferentes $\rightarrow$ si hay cambio

$H_0: t=T \rightarrow$ No hay cambio CONTRA $H_1: t \neq T \rightarrow$ Hay cambio

Estadístico K

$$V_t = \sum_{j=1}^T \text{signo}(x_t - x_j) \quad t = 1, \dots, T \quad (35)$$

$$U_t = U_{t-1} + V_t \quad \text{Con } U_1 = V_1 \quad (36)$$

$$K = \max |U_t|$$

El estadístico K se distribuye según:

$$P(k > K) = \exp \left[-\frac{6k^2}{T^3 + T^2} \right] \quad (37)$$

De esta distribución se obtiene el p-value para el estadístico K obtenido y de esta forma se decide si es significativo o no.

5.1.5 Caracterización hidroclimatológica

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de las series temporales y se determinó el régimen estacional de las diferentes variables hidroclimatológicas estimando el promedio mensual multianual con el fin de identificar el número y duración de las temporadas por año (Identificación de periodos de lluvia y periodos secos) y clasificarlas en régimen monomodal, bimodal o mixto.

5.1.6 Estimación de la oferta hídrica

La oferta hídrica es aquella porción de agua que después de precipitar sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes, llegando directa o indirectamente al mar. Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada por los hidrólogos como escorrentía superficial y su cuantificación conforma el elemento principal de medición en las redes de seguimiento hidrológico existentes en los distintos países (Rivera et al., 2004).

Para determinar la oferta hídrica de una cuenca considerando escenarios extremos se siguió la siguiente metodología: con la información morfométrica e hidroclimatológica de la cuenca se llevó a cabo el análisis de variabilidad climática, considerando el comportamiento del índice ONI, para esto se establecieron las anomalías con el caudal, con el fin de seleccionar los periodos o escenarios extremos correspondiente a los años más húmedos y secos, y establecer los caudales u oferta hídrica en estos periodos para las CRA y para las CRP del río Patía.

La oferta hídrica, se estimó de forma mensual para el periodo 1984 – 2018 con los registros históricos de las estaciones hidrométricas dentro de la cuenca. Para CRP para la cual no se cuenta con información de estaciones hidrométricas se estimó la oferta con tres metodologías para la estimación de caudales, la primera fue la transposición de caudales de la cuenca del río Mira, la cual es vecina a la cuenca de estudio y tienen una estación de caudales en el municipio de Tumaco la cual funciona desde 1981 a la actualidad, la segunda metodología fue estimar la oferta aplicando el método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS por sus siglas en inglés) para el cual se empleó la información morfológica, coberturas, usos de suelo y geología para estimar la escorrentía superficial, el tercer y último método fue la aplicación de un modelo lluvia escorrentía regionalizado para la zona, en este caso el modelo de tanques Thomas (abcd por el nombre de sus variables) el cual se calibró y validó con la información de la

estación San Juan del río Mira para determinar sus variables principales y realizar el cálculo de los caudales para las CRP.

5.1.6.1 Transposición de caudales

Esta metodología se basa principalmente en la relación de parámetros adimensionales que involucran las variables a transferir, y esto se determina principalmente mediante relaciones que incorporan la escorrentía y el área de la cuenca. Este método permite transferir información y establecer una relación entre el área, los caudales y las precipitaciones en la cuenca. Se aplica tanto en cuencas donde se dispone de información conocida como en zonas donde no se cuentan con dichos datos (Duitama Rincón et al., 2015; INVIAS, 2009).

$$\frac{Q_c}{A_c P_c} = \frac{Q_s}{A_s P_s} \quad (38)$$

Donde:

Q_s = caudal de la cuenca sin información.

Q_c = caudal de la cuenca con información.

A_s = Área de la cuenca sin información

A_c = Área de la cuenca con información

P_s = Precipitación de la cuenca sin información

P_c = Precipitación de la cuenca con información

Al considerar que se encuentra en una zona hidrológica homogénea se puede asumir que las precipitaciones son iguales o homogéneas, y por lo tanto se obtiene:

$$Q_s = Q_c \left(\frac{A_s}{A_c} \right)^n \quad (39)$$

n = Coeficiente de calibración para el caso general corresponde a 1, pero el exponente n es un valor que fluctúa usualmente entre 0.5 y 0.75. A falta de datos de investigación, se acostumbra a tomar un valor igual a 0.5 (INVIAS, 2009).

Empleando logaritmo natural en ambos lados de la expresión se puede calcular el coeficiente n , esto en cuencas que se tengan datos de caudal en varios puntos:

$$n = \frac{\ln \frac{Q_s}{Q_c}}{\ln \frac{A_s}{A_c}} \quad (40)$$

5.1.6.2 método lluvia escorrentía SCS

El SCS desarrolló un método para el cálculo de las abstracciones iniciales de una tormenta, las cuales incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración

denominada número de curva de escorrentía. La escorrentía es función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía (CN por sus siglas en ingles). Este método es aplicable para cuencas menores a 250 km² y se puede aplicar para conocer la escorrentía mensual y generar mapas de Isolíneas de escorrentía como ayuda para el cálculo de la oferta hídrica superficial (Clavijo Galvis & Romero Chedraui, 2017).

Máxima retención potencial (S) después de iniciada la escorrentía

$$S = 100 / CN \quad (41)$$

Las abstracciones iniciales se calculan como $I_a = 0.2S$. Por último, la precipitación efectiva es calculada como una función de la lluvia (P), de la y de S:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + 0.8S} \quad (42)$$

En la que P y S están expresados en pulgadas. Esta fórmula es válida para $P \geq 0.2S$; si $(P - 0.2S) \leq 0$, entonces $P_e = 0$.

Ya que la máxima retención potencial varía ampliamente, es más apropiado expresarla en términos del número de curva de escorrentía CN, un entero que varía en el rango de 1 a 100, de la siguiente forma:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (43)$$

En la que CN es el número de curva de escorrentía (adimensional), y S están en mm. Para CN=100, S=0; y para CN=1, S=25146 mm.

De esta manera, las abstracciones totales A (incluyendo intercepción, detención superficial e infiltración propiamente dicha) son iguales a:

$$A = P - P_e \quad (44)$$

Para determinar el número de curva CN se desarrolló como un índice el cual representa la combinación de los grupos hidrológicos del suelo de un área geográfica específica, el uso y la clase de tratamiento de la tierra. Los análisis empíricos formulados condujeron a deducir que el CN se debe entender en función de tres factores los cuales son:

- Clase de suelo
- Coberturas de la tierra
- Las condiciones de humedad antecedente (5 días).

Para poder determinar la curva de escorrentía se siguió el siguiente proceso metodológico:

5.1.6.2.1 Clasificación Hidrológica De Los Suelos En La Microcuenca

El SCS logró la clasificación hidrogeológica de más de 4.000 suelos basándose en su potencial de escurrimiento, para esto los agrupó en cuatro grupos de suelos hidrológicos, los cuales se identifican con las letras A, B, C y D. La clasificación del SCS se describe a continuación:

Suelos A. De bajo potencial de escurrimiento, buena permeabilidad por lo que la infiltración mantendrá valores altos, aun cuando estén húmedos. Pertenecen a este grupo los suelos gravosos, gravo-arenosos y arenosos gruesos.

Suelo B. Mantiene moderadas velocidades de infiltración y mayores valores de escurrimiento. En este grupo se consideran a suelos arenosos, limo-arenosos con reducida presencia de materia coloidal.

Suelo C. En estos suelos la infiltración es lenta, es frecuente la presencia de material muy fino, mezclados con partículas gruesas. A este grupo pertenecerán los suelos franco-arcillosos y franco-arcillo-arenoso.

Suelo D. Estos suelos son los que presentan mayor potencial de escurrimiento. Se consideran como suelos de este grupo a los de grano fino, que forman capas prácticamente impermeables por lo que la infiltración será muy lenta. En este caso se consideran los suelos arcillosos.

Para la determinación de la clase de suelos, se utilizó el mapa de zonificación nacional IGAC 2009 al cual en su característica de tipo de drenaje se le asignó el tipo de infiltración, en la Tabla 10 se presenta la clasificación que se utilizó para determinar el grupo hidrológico.

Tabla 10. Clasificación grupo hidrológico

DRENAJE	INFILTRACION	GH
Bien a excesivamente drenados	Rápida	A
Moderado a imperfectamente drenado	Moderada	B
pobre a Muy pobre drenado	Lenta	C
Pobre pantanoso a pobremente drenado	Muy lenta	D

Fuente: Esta investigación

5.1.6.2.2 Uso de suelo

En el uso del suelo se refiere principalmente a la condición superficial en la cuenca hidrográfica. El uso del suelo está asociado a las coberturas de la cuenca como son el uso urbano, agrícola, bosques, pastos etc. Los valores de CN usados conforme al uso y cobertura de la tierra se pueden ver en la Tabla 11. Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN compuesto.

$$CN_{pond} = \frac{\sum CN_i \times A_i}{At} \quad (45)$$

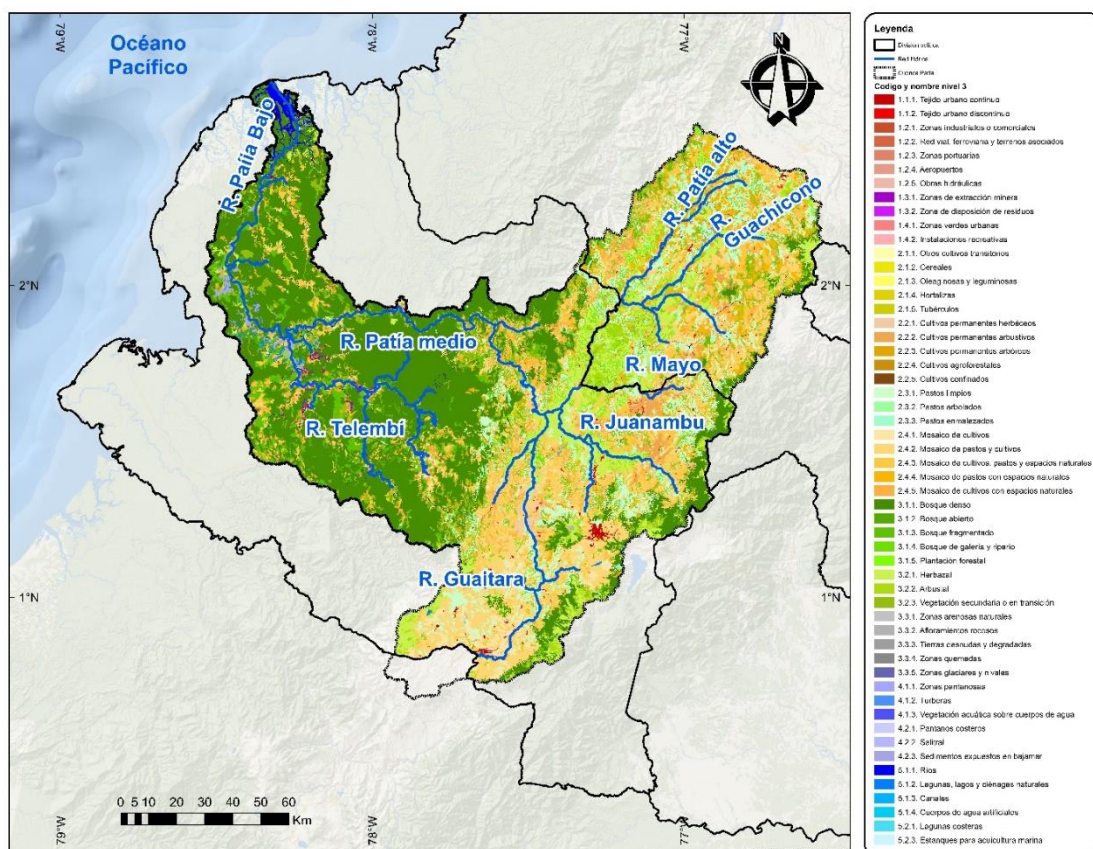


Figura 12. Uso del suelo cuenca río Patía
Fuente: IGAC 2018

Tabla 11. Numero de Curva según uso de suelo y grupo hidrológico

Cobertura	Código	Símbolo	CN			
			A	B	C	D
1.1.1. Tejido urbano continuo	111		77	85	90	92
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	112		49	69	79	84
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	121		81	88	91	93
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	122		74	84	90	92
1.2.3. Zonas portuarias	123		90	92	96	98
1.2.4. Aeropuertos	124		90	92	96	98
1.2.5. Obras hidráulicas	125		83	89	92	93
1.3.1. Zonas de extracción minera	131		63	77	85	88
1.3.2. Zona de disposición de residuos	132		72	82	87	89
1.4.1. Zonas verdes urbanas	141		30	58	71	78
1.4.2. Instalaciones recreativas	142		39	61	74	80
2.1.1. Otros cultivos transitorios	211		61	70	77	80
2.1.2. Cereales	212		60	72	80	84
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	213		66	77	85	89
2.1.4. Hortalizas	214		64	75	83	86
2.1.5. Tubérculos	215		65	76	84	88
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	221		49	69	79	84
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	222		35	56	70	77
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	223		43	65	76	82
2.2.4. Cultivos agroforestales	224		36	50	73	79
2.2.5. Cultivos confinados	225		61	70	77	80
2.3.1. Pastos limpios	231		39	61	74	80

Tabla 11. Numero de Curva según uso de suelo y grupo hidrológico

Cobertura	Código	Símbolo	CN			
			A	B	C	D
2.3.2. Pastos arbolados	232		32	58	72	79
2.3.3. Pastos enmalezados	233		46	68	78	84
2.4.1. Mosaico de cultivos	241		64	73	79	82
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	242		48	67	77	83
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243		35	56	70	77
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	244		30	48	65	73
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	245		30	58	71	78
3.1.1. Bosque denso	311		15	44	54	61
3.1.2. Bosque abierto	312		26	52	62	69
3.1.3. Bosque fragmentado	313		36	60	70	76
3.1.4. Bosque de galería y ripario	314		46	68	78	84
3.1.5. Plantación forestal	315		56	75	86	91
3.2.1. Herbazal	321		6	35	70	79
3.2.2. Arbustal	322		49	68	79	84
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	323		21	30	41	48
3.3.1. Zonas arenosas naturales	331		50	62	74	85
3.3.2. Afloramientos rocosos	332		74	83	88	90
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	333		76	85	90	93
3.3.4. Zonas quemadas	334		77	86	91	94
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	335		75	88	93	99
4.1.1. Zonas Pantanosas	411		21	32	45	52
4.1.2. Turberas	412		25	33	46	54
4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	413		20	30	40	50
4.2.1. Pantanos costeros	421		15	25	35	45
4.2.2. Salitral	422		18	28	38	48
4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar	423		88	92	94	99
5.1.1. Ríos	511		88	92	94	99
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	512		88	92	94	99
5.1.3. Canales	513		88	92	94	99
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	514		88	92	94	99
5.2.1. Lagunas costeras	521		88	92	94	99
5.2.3. Estanques para acuicultura marina	523		88	92	94	99

Fuente: Coberturas IGAC 2018 y CN adaptado de (Chow et al., 1996; INVIAS, 2009)

5.1.6.2.3 Humedad antecedente

La condición hidrológica está basada en la combinación de factores que afectan la infiltración y la escorrentía, incluyendo (a) densidad de áreas vegetales, (b) cantidad de años de la cubierta, (c) cantidad de pastos, (d) cantidad de cubierta residual sobre la superficie del suelo y (e) grado de rugosidad de la superficie.

Los números de curva que se muestran en la Tabla 11 se aplican para condiciones antecedentes de humedad (AMC, por sus siglas en inglés) normales (AMCII). Para condiciones secas (AMCI) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (46)$$

En la Tabla 12 se muestra el rango para las condiciones antecedentes de humedad para cada clase.

Tabla 12. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (Pulg)	
	Estación Inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: Adaptado de (Chow et al., 1996; INVIAS, 2009)

5.1.6.3 Modelo de Thomas

El modelo “abcd” es un modelo hidrológico no lineal el cual tiene como entradas la precipitación y la evapotranspiración potencial de la cuenca, para producir el flujo en la salida de manera agregada. El modelo representa la humedad almacenada en el suelo y el subsuelo, la escorrentía directa, la interrelación entre el río y el acuífero y la pérdida por evapotranspiración. Fue concebido originalmente por Thomas (1981) y Thomas et al., (1983), se basa en el balance hídrico dentro de un sistema que interacciona con el cauce principal. Este considera dos compartimentos para el análisis del balance hídrico: el suelo o zona de evapotranspiración, con almacenamiento Sw , y la zona saturada, con almacenamiento Sg (Figura 13. Modelo conceptual abcd). Por efectos de modelación, la componente de flujo subsuperficial en la parte superficial de la zona de evapotranspiración se puede incluir en la escorrentía directa (Ro). El modelo considera despreciable el flujo lateral profundo ($Qlat$) en la zona no saturada, de tal forma que la recarga potencial (infiltración según Thomas) es igualada a la recarga real (Rg) (Fragala & Neira, 2011; Loaiza Quintero, 2016).

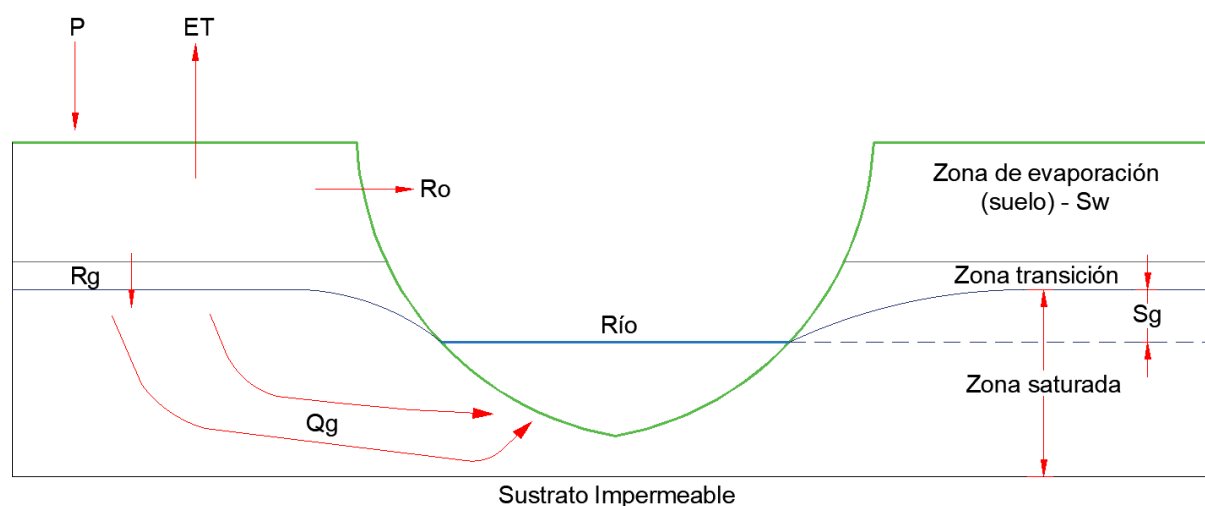


Figura 13. Modelo conceptual abcd
Fuente: Adaptado de (Fragala & Neira, 2011)

De esta forma, aplicando la ecuación de continuidad a un volumen de control Sw tenemos:

$$Pi - ETi - Rgi - Roi = \Delta Sw = Sw_i - Sw_{i-1} \quad (47)$$

Donde

P_i = la precipitación.

ET_i = la evapotranspiración real.

R_{gi} = la recarga o infiltración al subsuelo.

R_{oi} = la escorrentía directa.

ΔSw = el cambio en el almacenamiento del suelo.

Sw_i = contenido de humedad inicial.

Sw_{i-1} = contenido de humedad final.

Thomas (1981) y Thomas et al., (1983) definen las variables W_i (agua disponible) e Y_i como:

$$W_i = P_i + Sw_{i-1} \quad (48)$$

$$Y_i = ET_i + Sw_i \quad (49)$$

Algunas pruebas de ensayo han determinado que el contenido de humedad en el suelo disminuye de forma exponencial y Thomas se basa en esta experiencia asumiendo este criterio relacionándolo con la ET según:

$$Sw_i = Y_i e^{\left(-\frac{ET_i}{b}\right)} \quad (50)$$

Thomas (1981) define la variable de estado Y_i como una función no lineal del agua disponible según los parámetros a (adimensional) y b :

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_i + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_i b}{a}} \quad (51)$$

Donde a y b son parámetros que se determinan a partir de mediciones de precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo en la cuenca. Esta función asegura que $Y_i \leq W_i$, $Y_i'(0) = 1$ y $Y_i'(\infty) = 0$ (Alley, 1984).

El límite superior de Y_i es representado por el parámetro b . Thomas et al. (1983) hacen notar que, a excepción de estas propiedades, la función Y_i no tiene algún significado particular. Entonces, al sustituir las ecuaciones (48) y (49) en la (47) se obtiene:

$$W_i - Y_i = R_{oi} + R_{gi} \quad (52)$$

Para diferenciar la escorrentía de la recarga se asume un coeficiente de reparto c que está relacionado con el índice de flujo base:

$$R_{gi} = (c)(W_i - Y_i) \quad (53)$$

$$R_{oi} = (1 - c)(W_i - Y_i) \quad (54)$$

El caudal subterráneo (Q_{gi}), es decir, aquella fracción del caudal observado en el río que proviene del almacenamiento en la zona saturada (S_{gi}), es:

$$Qg_i = d Sg_i \quad (55)$$

$$Sg_i = (Sg_{i-1} + Rg_i)/(1 + d) \quad (56)$$

El caudal para el periodo i es:

$$Q_i = Ro_i + Qg_i \quad (57)$$

A pesar de que este es un modelo de balance, y que estos presentan limitación, ya que reproducen condiciones promedio de la cuenca y no permiten simular la variabilidad espacial del sistema, se ha demostrado que son una fuerte herramienta de planeación y gestión de recursos hídricos (Correa Pimienta & Díaz Castañeda, 2005).

Para determinar la bondad de ajuste del modelo se utilizaron las siguientes metodologías:

NSE The Nash-Sutcliffe Efficiency determina la magnitud relativa de la varianza residual “el ruido” comparado con la varianza de los datos medidos “la información”. Indica que tan bien se adapta la curva de datos observados vs. Simulados a la línea con pendiente 1:1 (45°). Su rango es $-\infty < NSE \leq 1.0$, siendo el valor óptimo $NSE = 1.0$.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{Observado} - Q_i \text{Simulado})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{Observado} - Q_i \text{promedio})^2} \right] \quad (58)$$

RSR por RMSE-observations standard deviation ratio incluye los beneficios de los índices estadísticos de error (RMSE) incluyendo el ajuste de escala/normalización (al dividir por la desviación estándar σ). Su valor óptimo es $RSR = 0$ que implica una simulación perfecta del modelo o cero variación residual. Entre menor sea su valor, mejor el desempeño del modelo.

$$RSR = \frac{RMSE}{DESVEST_{obs}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{Observado} - Q_i \text{Simulado})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{Observado} - Q_i \text{promedio})^2}} \right] \quad (59)$$

PBIAS del inglés Percent BIAS mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que su contraparte (datos observados). El valor óptimo es $PBIAS = 0$, valores positivos $PBIAS > 0$ indican subestimación del modelo, valores negativos $0 < PBIAS$ indican sobrestimación del BIAS en el modelo, en el sentido de que tan ancha es la campana en las curvas comparativas Simulación vs. Observación.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{Observado} - Q_i \text{Simulado})}{\sum_{i=1}^n (Q_i \text{Observado})} \right] * 100 \quad (60)$$

Tabla 13. Niveles de desempeño estadístico

PBIAS	NSE	RSR	Interpretación Modelo
$PBIAS < \pm 10$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.00 < RSR \leq 0.50$	Muy Bueno
$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	Bueno
$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$0.60 < RSR \leq 0.70$	Satisfactorio
$PBIAS \geq \pm 25$	$NSE < 0.50$	$RSR > 0.70$	No satisfactorio

Fuente: adaptado de (Moriassi et al., 2007)

5.2 Objetivo 2

5.2.1 Selección de índices macroclimáticos

Se seleccionaron los siguientes índices ONI, SOI, TSM, MEI, PDO, EMI y TNI, se escogieron estos índices ya que varios estudios han establecido que existen correlaciones significativas con datos de caudal y precipitación en la región cercana a la zona de estudio. Los estudios antecedentes revisados fueron: los estudios de Chanchala et al., (2020a) y (2020b) donde estudiaron la correlación de las precipitaciones del departamento de Nariño con los índices macroclimáticos ONI, SOI, PDO, TSM y MEI, de la misma forma en el estudio de Córdoba et al., (2015b) quien evaluó el comportamiento de las precipitaciones estacionales en Colombia con El Niño Canónico y el Niño Modoki (EMI). También en el estudio de Chanchala et al., (2020c) se evaluaron las correlaciones con los índices ONI, SOI, PDO, TSM y MEI sobre los caudales medio mensuales de las principales cuencas del pacífico Colombiano, así mismo Quishpe et al., (2019) evaluó la influencia de la TSM, ONI, EMI y TNI sobre los caudales en la república del Ecuador. En la Tabla 14 y Tabla 15 se describen los índices seleccionados.

Tabla 14. Índices macroclimáticos de tipo Atmosférico

Índice macroclimático	Descripción
MEI: Índice Multivariado del ENSO*	Serie de tiempo de la FOE Combinada Principal de cinco variables: presión, TSM, viento, radiación de onda larga (componente zonal y meridional)
SOI: Índice de Oscilación del Sur	Diferencia de presión atmosférica entre Tahití y Darwin

* Este índice también es catalogado en el tipo oceánico ya que utiliza la TSM.

Tabla 15. Índices macroclimáticos de tipo oceánico

Índice macroclimático	Descripción
Niño 3: TSM en la región Niño 3	Anomalía de la TSM en el Pacífico Tropical Central (5N-5S, 150W-90W)
Niño 1+2: TSM en la región Niño 1+2	Anomalía de la TSM en el Extremo Este del Pacífico Tropical (0-10S, 90W-80W)
Niño 4: TSM en la región Niño 4	Anomalía de la TSM en el Pacífico Oriental (5N-5S, 160E-150W)
Niño 3.4: TSM en la región Niño 3.4	Anomalía de la TSM entre la región Niño 3 y Niño 4 (-5S-5N, 170W-120W)
ONI: Índice del Niño Oceánico	Tres meses de media de la anomalía de TSM en la región de El Niño 3.4 basado en el cambio de periodo base de 30 años de registro
TNI: Índice del Niño Trans	Es el T-Niño 1+2 estandarizado menos el T-Niño 4 con una media corrida de 5 meses aplicada que luego se estandariza usando el período 1950-1979

Tabla 15. Índices macroclimáticos de tipo oceánico

Índice macroclimático		Descripción
PDO:	Índice	
Oscilación Decadal del Pacífico		Anomalía mensual de TSM sobre el Océano Pacífico Norte, desde 20N hacia el polo
EMI: Índice del Niño Modoki		Posee 3 términos derivados de un promedio de área de la anomalía de TSM en las siguientes regiones A (165°E-140°W, 10°S-10°N), B (110°W-70°W, 15°S-5°N)

5.2.2 Influencia de índices macroclimáticos asociado a ENOS

Para entender la influencia de los índices climáticos asociados a ENOS sobre la variabilidad estacional de la oferta hídrica de la cuenca del río Patía, se realizó el análisis de correlaciones sincrónicas de caudales y los diferentes índices climáticos seleccionados empleando correlaciones de Pearson, para establecer el grado de correlación entre los principales modos de variabilidad de la oferta hídrica y los índices climáticos. Las correlaciones de Pearson se consideraron como estadísticamente significativas mediante la prueba T-Student con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$).

Según Restrepo et al., (2007) el coeficiente de correlación de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta. El coeficiente se define por la siguiente fórmula.

$$\rho(x,y) = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{Cov(x,y)}{\sqrt{Var(x) \cdot Var(y)}} \quad -1 \leq \rho \leq 1 \quad (61)$$

Donde

σ_{xy} es la covarianza de (x,y)

σ_x es la desviación estándar de la variable X

σ_y es la desviación estándar de la variable Y

Cuando la correlación es menor a cero significa que es negativa, es decir, que las variables se relacionan inversamente, cuando el valor de alguna variable es alto, el valor de la otra variable es bajo. Mientras más próximo se encuentre a -1, más clara será la covariación extrema. Si el coeficiente es igual a -1, nos referimos a una correlación negativa perfecta.

Con una correlación mayor a cero, en este caso significa que la correlación es positiva, es decir, que las variables se correlacionan directamente. Lo cual implica que cuando el valor de una variable es alto, el valor de la otra también lo es, sucede lo mismo cuando son bajos; mientras más próximo se encuentre a +1 el coeficiente será covariación. Si el coeficiente es igual a +1, se refiere a una correlación positiva perfecta.

Correlación igual a cero: Cuando la correlación es igual a cero significa que no es posible determinar algún sentido de covariación. Sin embargo, no significa que no exista una relación no lineal entre las variables; cuando las variables son independientes significa que estas se encuentran correlacionadas, pero esto no significa que el resultado sea verdadero.

Adicionalmente, para investigar la relación entre el fenómeno ENOS y los caudales estacionales de las CRA y CRP del río Patía se empleó el análisis de composiciones de fases separadas las cuales son útiles para determinar las características de los caudales en cada fase (Fogt et al., 2011). En este sentido, se utilizó la definición de eventos ENOS (LN y EN) y No ENOS descritos a través del índice ONI en el periodo 1984-2018. La selección de eventos se realizó seleccionando el 25% de eventos que se encuentran por encima del percentil 75 y el 25% de eventos que se encuentran por debajo del percentil 25. Una vez seleccionados los eventos, se promediaron para formar la composición (Welhouse et al., 2016).

6 ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 Objetivo 1

6.1.1 Caracterización morfométrica

Las subzonas hidrográficas delimitadas en la cuenca Río Patía fueron un total de 30, de las cuales 27 corresponden a las estaciones hidrométricas 24 pertenecientes a las CRA y 3 a las CRP, adicionalmente se delimitan 3 subcuencas las cuales se denominaron con el nombre de Patía Medio, Telembí y Patía Bajo pertenecientes a las CRP. Para las 30 subcuencas se delimitan las características morfométricas, fisiográficas, perfil longitudinal del cauce principal y curva hipsométrica las cuales describen las características morfométricas y fisiográficas de la zona hidrográfica del río Patía (ver Tabla 16 y Tabla 17. En la Tabla 18 se presenta la caracterización con la descripción de cada una de las subcuencas.

Donde:

A (km ²)	: Área total de la cuenca
P (km)	: Perímetro de la cuenca
Lm (km)	: Longitud de máximo recorrido
I (km)	: Ancho máximo
Lc (km)	: Longitud del cauce principal
Ls (km)	: Longitud cauce principal, medida sobre un trazado suave del cauce
Amay (km ²)	: Área de la vertiente mayor
Amen (km ²)	: Área de la vertiente menor
F	: Factor de forma
Kc	: Coeficiente de compacidad
Ia	: Índice de alargamiento
Ias	: Índice asimétrico
Emín (m.s.n.m)	: Elevación mínima de la cuenca
Emáx (m.s.n.m)	: Elevación máxima de la cuenca
Em (m.s.n.m)	: Elevación media de la cuenca

km (m/km^2)	: Coeficiente de masividad
Co	: Coeficiente orográfico
Sm (%)	: Pendiente media de la cuenca
$\sum Li$ (km)	: Sumatoria longitud de drenajes de la cuenca
Dd (km/km^2)	: Densidad de drenaje
C (km^2/km)	: Constante de estabilidad del río
$n1$	: Número de corrientes de primer orden según el método de Horton
Ct (km^{-2})	: Índice de torrencialidad
$S1$ (%)	: Pendiente media del cauce principal (Elevaciones Extremas)
$Tc1$ (h)	: Tiempo de concentración (promedio a partir de $S1$)
$S2$ (%)	: Pendiente media del cauce principal (Método Taylor Schwarz)
$Tc2$ (h)	: Tiempo de concentración (promedio a partir de $S2$)
Sin	: Sinuosidad del cauce principal

Tabla 16. Parámetros fisiográficos subcuencas río Patía

Región	Punto de cierre	A (km²)	P (km)	CN	Lm (km)	I (km)	Lc (km)	Ls (km)	Amay (km²)	Amen (km²)	Emín (m.s.n.m)	Emáx (m.s.n.m)	Em (m.s.n.m)
Andina	Carlosama	198.28	91.26	35	27.2	17.0	38.85	33.10	126.33	71.95	2817	4756	3420.07
	Yunguilla	371.72	94.35	37	32.4	16.0	40.56	33.84	208.67	163.05	1354	3951	2627.83
	Pilcuán	1431.14	238.14	41	61.2	65.0	97.71	81.81	833.91	597.23	1756	4756	3150.11
	San Pedro	3201.12	339.85	39	89.4	65.0	149.22	122.18	1612.89	1588.23	728	4756	2921.23
	Agroyaco	3992.42	392.41	59	110.2	62.0	176.24	144.94	2283.42	1709.01	421	4756	2762.03
	Bocatoma Centenario	67.59	38.68	36	12.0	10.0	15.05	13.09	34.69	32.90	2615	3637	3032.68
	Universidad	213.28	78.42	43	17.0	25.0	29.53	25.14	153.65	59.64	2464	4205	2980.33
	Providencia	458.96	119.03	39	35.2	25.0	60.32	48.50	238.14	220.82	1055	4221	2636.55
	Puente Juanambú	1339.63	183.67	29	48.5	42.0	87.25	72.33	669.82	669.81	758	4138	2421.04
	La Cañada	335.19	89.12	32	24.0	19.0	33.56	28.89	198.07	137.12	1665	4178	2774.52
	Puente Fierro Guachicono	730.39	141.38	32	39.7	30.0	61.69	52.12	509.78	220.61	902	4401	2412.65
	La Playa	666.45	140.11	35	37.0	36.0	57.69	49.79	353.73	312.72	684	3602	2168.94
	Guachicono	958.52	164.44	32	47.5	30.0	81.32	70.38	700.03	258.49	704	4405	2173.21
	Puente Carretera (El Tambo 1)	277.38	107.50	39	34.2	11.0	46.37	38.11	223.54	53.83	897	3674	1844.37
	Puente Carretera (El Tambo)	270.58	110.23	32	39.0	12.0	51.88	45.07	170.84	99.74	866	4395	2264.63
	Puente Colgante Timbío	764.33	201.03	33	50.0	60.4	74.61	63.45	683.42	80.91	591	3674	1673.53
	El Hoyo	628.32	163.58	27	51.2	19.5	78.19	68.39	423.45	204.87	604	4395	1603.71
	Bocatoma Sajandi	37.29	36.58	33	11.8	5.6	17.68	16.04	22.01	15.28	776	2849	1520.93
	La Fonda	1637.53	255.66	33	55.0	66.0	88.88	77.86	1182.08	455.45	568	4395	1624.46
	Puente Carretera_(Balboa)	246.01	79.38	34	23.5	20.0	34.44	30.68	180.81	65.20	555	3456	1962.35
	Puerto Nuevo Patía	5064.84	382.35	34	86.6	75.0	133.32	116.53	3307.35	1757.49	498	4412	1685.55
Pacífico	Puente Guasca	8749.24	531.71	33	124.5	160.0	182.12	160.59	6677.08	2072.16	419	4412	1820.51
	Puente Pusmeo	12893.80	744.68	34	126.4	232.0	194.25	171.81	10786.36	2107.45	362	4756	2111.23
	Los Nortes	13047.49	756.34	34	123.8	232.0	185.33	165.14	11281.47	1766.01	277	4756	2098.53
	Patía medio	2137.47	583.68	28	108.2	49.2	124.90	126.93	1104.12	1033.35	19	301	663.65
	El Vergel	43.43	29.27	31	8.4	9.5	9.70	8.66	32.02	11.41	1665	3552	2431.74
	El Sande	150.61	59.76	22	17.6	14.0	25.49	21.73	100.56	50.05	754	2996	1836.71
	Sali	1755.56	230.82	22	63.8	38.0	110.52	92.96	1412.83	342.74	32	3775	1293.89
	Telembí	4581.46	493.53	23	95.1	77.1	160.45	118.06	2552.99	2028.47	19	2529	931.57
	Patía bajo	2825.69	675.06	55	118.9	52.6	149.98	104.06	1801.44	1024.25	0	19	33.67

Tabla 17. Características morfométricas

Región	Punto de cierre	F	Kc	la	las	km (m/km ²)	Co	Sm (%)	ΣLi (km)	Dd (km/km ²)	C (km ² /km)	n1	Ct (km ⁻²)	S1(%)	Tc1(h)	S2(%)	Tc2(h)	Sin
Andina	Carlosama	0.27	1.81	1.60	1.76	17.25	0.06	21.31	499.66	2.52	0.40	549	2.77	4.99	6.28	1.75	9.27	1.17
	Yunguilla	0.35	1.37	2.03	1.28	7.07	0.02	44.40	739.61	1.99	0.50	888	2.39	6.40	6.39	4.70	7.17	1.20
	Pilcuán	0.38	1.76	0.94	1.40	2.20	0.01	24.05	3293.62	2.30	0.43	3745	2.62	3.07	12.05	2.39	18.76	1.19
	San Pedro	0.40	1.68	1.38	1.02	0.91	0.00	30.08	7200.55	2.25	0.44	8432	2.63	2.70	17.27	1.78	30.40	1.22
	Agroyaco	0.33	1.74	1.78	1.34	0.69	0.00	33.86	8797.93	2.20	0.45	10498	2.63	2.46	20.14	1.77	34.68	1.22
	Bocatoma Centenario	0.47	1.32	1.20	1.05	44.87	0.14	27.38	155.59	2.30	0.43	172	2.54	6.79	2.78	4.77	3.15	1.15
	Universidad	0.74	1.50	0.68	2.58	13.97	0.04	24.80	522.04	2.45	0.41	531	2.49	5.90	4.02	2.50	6.99	1.17
	Providencia	0.37	1.56	1.41	1.08	5.74	0.02	33.37	1061.90	2.31	0.43	1122	2.44	5.25	7.17	3.16	10.80	1.24
	Puente Juanambú	0.57	1.41	1.15	1.00	1.81	0.00	42.29	2810.01	2.10	0.48	3536	2.64	3.87	10.35	2.18	18.07	1.21
	La Cañada	0.58	1.36	1.26	1.44	8.28	0.02	42.39	699.27	2.09	0.48	874	2.61	7.49	4.15	4.27	6.56	1.16
	Puente Fierro Guachicono	0.46	1.46	1.32	2.31	3.30	0.01	43.49	1527.91	2.09	0.48	2017	2.76	5.67	7.14	3.43	11.35	1.18
	La Playa	0.49	1.52	1.03	1.13	3.25	0.01	43.01	1431.17	2.15	0.47	1898	2.85	5.06	7.00	3.55	10.64	1.16
	Guachicono	0.42	1.49	1.58	2.71	2.27	0.00	41.41	2048.72	2.14	0.47	2675	2.79	4.55	9.37	2.28	16.18	1.16
	Puente Carretera (El Tambo 1)	0.24	1.81	3.11	4.15	6.65	0.01	30.88	606.44	2.19	0.46	755	2.72	5.99	5.65	4.08	7.85	1.22
	Puente Carretera (El Tambo)	0.18	1.88	3.25	1.71	8.37	0.02	38.32	595.90	2.20	0.45	775	2.86	6.80	5.95	3.89	8.51	1.15
	Puente Colgante Timbío	0.31	2.04	0.83	8.45	2.19	0.00	35.95	1682.15	2.20	0.45	2164	2.83	4.13	9.01	2.39	14.60	1.18
	El Hoyo	0.24	1.83	2.63	2.07	2.55	0.00	33.30	1395.13	2.22	0.45	1815	2.89	4.85	8.94	2.48	14.37	1.14
	Bocatoma Sajandi	0.27	1.68	2.11	1.44	40.79	0.06	45.39	75.91	2.04	0.49	102	2.74	11.73	2.25	6.42	2.92	1.10
	La Fonda	0.54	1.77	0.83	2.60	0.99	0.00	35.92	3602.49	2.20	0.45	4688	2.86	4.31	10.19	1.77	20.49	1.14
	Puente Carretera_(Balboa)	0.45	1.42	1.18	2.77	7.98	0.02	58.56	514.49	2.09	0.48	730	2.97	8.42	4.10	5.20	5.92	1.12
	Puerto Nuevo Patía	0.68	1.50	1.15	1.88	0.33	0.00	37.26	11150.18	2.20	0.45	14500	2.86	2.94	15.47	1.59	32.65	1.14
	Puente Guasca	0.56	1.59	0.78	3.22	0.21	0.00	38.27	19119.00	2.19	0.46	24302	2.78	2.19	21.34	1.51	43.51	1.13
	Puente Pusmeo	0.81	1.84	0.54	5.12	0.16	0.00	37.09	28227.09	2.19	0.46	35220	2.73	2.26	22.22	1.43	49.74	1.13
	Los Nortes	0.85	1.85	0.53	6.39	0.16	0.00	37.27	28551.28	2.19	0.46	35642	2.73	2.42	21.04	1.37	49.51	1.12
Pacífico	Patía medio	0.18	3.53	2.20	1.07	0.31	0.00	34.77	527.22	1.91	0.52	35684	2.35	0.23	31.42	0.12	77.77	0.98
	El Vergel	0.62	1.24	0.88	2.81	56.00	0.14	57.42	80.40	1.85	0.54	116	2.67	19.46	1.24	12.39	1.63	1.12
	El Sande	0.49	1.36	1.26	2.01	12.19	0.02	52.64	304.96	2.02	0.49	422	2.80	8.80	3.22	5.96	4.42	1.17
	Sali	0.43	1.54	1.68	4.12	0.74	0.00	41.79	3749.68	2.14	0.47	4935	2.81	3.39	12.87	2.59	20.13	1.19
	Telembí	0.51	2.04	1.23	1.26	0.20	0.00	32.77	1292.09	1.10	0.91	9481.5	2.07	1.56	21.35	0.19	85.39	1.36
	Patía bajo	0.20	3.56	2.26	1.76	0.01	0.00	11.20	669.74	1.37	0.73	45231.5	2.00	0.01	90.87	0.02	226.76	1.44

Tabla 18. Caracterización morfométrica

Región	Punto de cierre	Tipo de río CH	Descripción
Andina	Carlosama	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Yunguilla	Joven	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Pilcuán	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	San Pedro	Joven	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Agroyaco	Joven	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Bocatoma Centenario	Maduro	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Universidad	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Providencia	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Juanambú	Joven	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado distribuido uniformemente. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	La Cañada	Maduro	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.

Tabla 18. Caracterización morfométrica

Región	Punto de cierre	Tipo de río CH	Descripción
Andina	Puente Fierro Guachicono	Maduro	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	La Playa	Joven	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Guachicono	Maduro	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Carretera (El Tambo 1)	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Carretera (El Tambo)	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Colgante Timbío	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	El Hoyo	Viejo	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Bocatoma Sajandi	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	La Fonda	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Carretera (Balboa)	Joven	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve escarpado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.

Tabla 18. Caracterización morfométrica

Región	Punto de cierre	Tipo de río CH	Descripción
Andina	Puerto Nuevo Patía	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Guasca	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Puente Pusmeo	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Los Nortes	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve muy fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
Pacífico	Patía medio	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	El Vergel	Maduro	Cuenca redonda a oval redonda, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal corto recargado a una de sus vertientes. Subcuenca montañosa con relieve escarpado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	El Sande	Joven	Cuenca de oval redonda a oval oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve escarpado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Sali	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve poco accidentado, medianamente drenada, cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.
	Telembí	Maduro	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve fuertemente accidentado, medianamente drenada, suelos altamente permeables, que implican una alta capacidad de infiltración o regiones con densa cobertura vegetal.
	Patía bajo	Viejo	Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, alargada con baja susceptibilidad a las avenidas, cauce principal alargado recargado a una de sus vertientes. Subcuenca moderadamente montañosa con relieve poco accidentado, medianamente drenada, suelos altamente permeables, que implican una alta capacidad de infiltración o regiones con densa cobertura vegetal.

Con respecto a los resultados se pudo establecer que los coeficientes de forma muestran que el coeficiente de compacidad “Kc” varía entre 1.32 a 2.04 para las CRA y de 1.24 a 3.56 para las CRP. Los resultados indican que la mayoría de las cuencas son de forma oval redonda a oval oblonga, las CRP son cuencas mayormente alargadas que tienden a ser rectangulares ya que tienen los mayores valores de este coeficiente. Igualmente, el coeficiente de forma “F” para las CRA oscilan entre 0.18 a 0.85 y para las CRP oscilan de 0.18 a 0.62, por lo tanto, son cuencas alargadas con baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales. Por su parte, el índice de alargamiento “Ia” se encuentra entre 0.53 a 3.25 para las CRA y de 0.88 a 2.26 para las CRP, esto indica que mayoritariamente las cuencas son más largas que anchas y finalmente el índice asimétrico “Ias” oscila entre los valores 1.0 a 8.45 para las CRA y de 1.07 a 4.12 para las CRP, indicando que principalmente las cuencas tienen una vertiente mayor, excepto la cuenca del Puente Juanambú la cual registra dos vertientes iguales.

Con respecto a la pendiente media de la cuenca, los resultados muestran que las pendientes varían de 11% a 56%, para lo cual se determinó que solo la cuenca Patía bajo es la de menor pendiente media y su relieve se clasifica como medianamente accidentado. Adicionalmente, 11 cuencas se clasifican como relieve fuertemente accidentado, ya que tienen pendientes entre 20% y 35%, 15 cuencas se clasifican en muy fuertemente accidentado por tener pendientes entre 35% y 50% y 3 cuencas con relieve escarpado por tener pendientes superiores al 50%. Respecto al coeficiente de masividad “km” oscila entre los valores 0.16 a 44.87 para las CRA y de 0.01 a 56 para las CRP, indicando que las cuencas son moderadamente montañosas en su gran mayoría y en menor proporción montañosas.

Por su parte, la curva hipsométrica clasifica a los ríos como joven, maduro o viejo para la cuenca del río Patía, los resultados registran que la mayoría de los ríos son maduros con 21 cauces principales clasificados de esta forma, 7 ríos Jóvenes y 2 ríos viejos (Ver Tabla 18). Con respecto a las características de la red de drenaje se tiene que la densidad de drenaje “Dd” para las CRA oscila entre 1.99 y 2.52 y para las CRP oscila entre 2.2 y 1.1 lo cual las clasifica como medianamente drenadas en las dos zonas. Considerando, la constante de estabilidad del río “C” se registran valores de 0.5 a 0.4 en las CRA lo cual las clasifica como cuenca con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo. En las CRP los valores se encuentran entre 0.91 a 0.45 siendo las cuencas Telembí y Patía Bajo las de mayores índices de estabilidad y por lo tanto se clasifican como cuencas con suelos altamente permeables, que implican una alta capacidad de infiltración o regiones con densa cobertura vegetal. Con respecto a la sinuosidad del cauce “Sin” los resultados muestran que mayoritariamente los ríos son rectos, excepto los ríos Patía Bajo y Telembí que tienen un índice por encima de 1.25 lo cual indica que son sinuosos. En la Tabla 19 se presentan los valores máximos, mínimos y medios de los coeficientes morfométricos calculados para la cuenca río Patía clasificados por regiones.

Tabla 19. Resumen coeficientes morfométricos por región de la cuenca río Patía

Cuencas	Valor	Kc	F	la	las	km	Sm	Co	Dd	C	Sin
CRA	Máximo	2.04	0.85	3.25	8.45	44.87	58.56	0.14	2.52	0.50	1.24
	Mínimo	1.32	0.18	0.53	1.00	0.16	21.31	0.00	1.99	0.40	1.10
	Promedio	1.63	0.46	1.41	2.55	7.88	36.79	0.02	2.20	0.46	1.17
CRP	Máximo	3.56	0.62	2.26	4.12	56.00	57.42	0.14	2.20	0.91	1.44
	Mínimo	1.24	0.18	0.88	1.34	0.01	11.20	0.00	1.10	0.45	0.98
	Promedio	2.15	0.39	1.61	2.41	10.02	37.78	0.02	1.80	0.59	1.21

6.1.2 Tratamiento de datos hidrometeorológicos

6.1.2.1 Análisis exploratorio

En este aparte se realizó un análisis exploratorio de los datos que busca determinar las características básicas de estas series temporales, también busca detectar los datos faltantes para posteriormente realiza el completado de datos. Para las estaciones hidrométricas los estadísticos básicos se presentan en la Tabla 20, mientras que para las estaciones pluviométricas se presentan en la Tabla 21.

En cuanto a los resultados de las estaciones hidrométricas se tienen que las estaciones la Playa (50.5%) y Puente Carretera 3 (41.7%), presentan el mayor número de datos faltantes (DF), por lo tanto, estas estaciones no se tendrán en cuenta en los siguientes análisis, ya que se considera como máximo realizar el completado de datos a las estaciones que presenten un porcentaje menor igual al 40% de datos faltantes.

Tabla 20. Estadísticos básicos estaciones hidrométricas cuenca río Patía

Subcuenca	ID	# DF	% DF	Promedio (m ³ .s ⁻¹)	Máximo (m ³ .s ⁻¹)	Mínimo (m ³ .s ⁻¹)	Desv. Est (m ³ .s ⁻¹)	CV
GUAITARA	CAR	24	5.7	3.34	15.55	0.86	1.96	0.59
	YUN	18	4.3	6.92	32.32	0.91	5.06	0.73
	PIL	100	23.8	35.20	99.10	3.47	14.12	0.40
	SPE	15	3.6	55.06	190.10	3.92	24.13	0.44
	AGR	161	38.3	81.99	248.50	30.50	35.03	0.43
JUANAMBU	CEN	92	21.9	1.50	7.82	0.13	0.90	0.60
	UNI	14	3.3	3.36	10.30	0.80	1.56	0.46
	PRV	130	31.0	9.54	29.59	1.44	5.21	0.55
	PTJ	41	9.8	36.48	160.20	7.48	17.10	0.47
MAYO	CAN	44	10.5	13.64	46.30	4.04	5.40	0.40
GUACHICONO	PTF	152	36.2	21.49	84.53	4.09	13.21	0.61
	LPY	212	50.5	18.78	124.20	2.47	16.59	0.88
	GCH	121	28.8	33.27	113.70	5.47	21.29	0.64
PATIA ALTO	PTC2	158	37.6	11.69	40.46	0.81	8.93	0.76
	PTC3	175	41.7	8.31	30.72	1.24	6.23	0.75
	PTT	140	33.3	27.15	111.40	4.02	19.62	0.72
	HYO	140	33.3	18.26	101.00	0.60	16.22	0.89
	SAJ	143	34.0	13.01	75.13	0.25	11.39	0.88
	FON	80	19.0	62.74	312.80	4.10	48.37	0.77
	PTC1	140	33.3	14.38	64.23	1.10	10.64	0.74
	PNP	122	29.0	138.14	581.90	10.39	102.39	0.74

Tabla 20. Estadísticos básicos estaciones hidrométricas cuenca río Patía

Subcuenca	ID	# DF	% DF	Promedio (m ³ .s ⁻¹)	Máximo (m ³ .s ⁻¹)	Mínimo (m ³ .s ⁻¹)	Desv. Est (m ³ .s ⁻¹)	CV
PATIA MEDIO	PTG	168	40.0	208.72	876.90	51.10	130.13	0.62
	PTP	136	32.4	300.95	1006.00	87.83	160.18	0.53
	NOR	154	36.7	349.54	1418.00	70.94	221.87	0.63
TELEMBI	VER	60	14.3	3.77	15.22	0.22	2.65	0.70
	SND	156	37.1	15.73	39.95	2.82	7.95	0.51
	SLI	155	36.9	407.99	853.00	109.00	161.77	0.40

Nota: DF: datos faltantes; CV: Coeficiente de variación; Variable caudal medio mensual.

Tabla 21. Estadísticos básicos estaciones pluviométricas cuenca río Patía

Cuenca	ID	# DF	% DF	Promedio (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desv. Est (mm)	CV
CRP	VER	9	2.14	213.40	656.6	0	144.43	0.68
	SDE	12	2.86	377.42	1112.5	4.4	224.93	0.60
	BAR	21	5.00	555.54	1236.8	46.5	257.82	0.46
	MAG	17	4.05	406.82	1376.7	25	238.59	0.59
	SHA	5	1.19	398.26	1387	0	241.59	0.61
	REM	39	9.29	233.32	1020	3.7	167.17	0.72
	MOS	8	1.90	299.74	1256.3	0	198.39	0.66

Nota: DF: datos faltantes; CV: Coeficiente de variación; Variable precipitación total mensual.

Con respecto a los resultados de los estadísticos básicos de las estaciones de precipitación seleccionadas para las CRP del río Patía se tiene que el porcentaje de datos faltantes es bajo, por lo tanto, todas estas estaciones serán consideradas en los análisis posteriores.

6.1.2.2 Completado de datos faltantes

Al realizar el completado de datos faltantes aplicando NLPCA con redes neuronales se utilizó la arquitectura [14-13-14] para el conjunto de datos de precipitación y [27-26-27] para el conjunto de datos de caudal. La mejor reconstrucción de la base de datos de precipitación presentó una varianza explicada total del 87.9 % y un error cuadrático medio (RMSE) de ± 8.2 mm. Mientras que para la base de datos de caudal medio mensual se obtuvo una varianza explicada de 97.9 % y un RMSE de ± 1.7 m³.s⁻¹.

En relación con el rango de variación del conjunto completo de datos de precipitación mensual (0-830 mm) y caudal medio mensual (0.1-1418 m³.s⁻¹), los resultados del error cuadrático medio del completado de cada conjunto de datos indican que la reconstrucción de las series utilizando el método de NLPCA con redes neuronales es satisfactoria.

A continuación, en la Figura 14 se presenta la gráfica de los datos originales reportados por el IDEAM y los datos estimados con el NLPCA para la estación de caudales Los Nortes la cual presenta un 36.7% de datos faltantes.

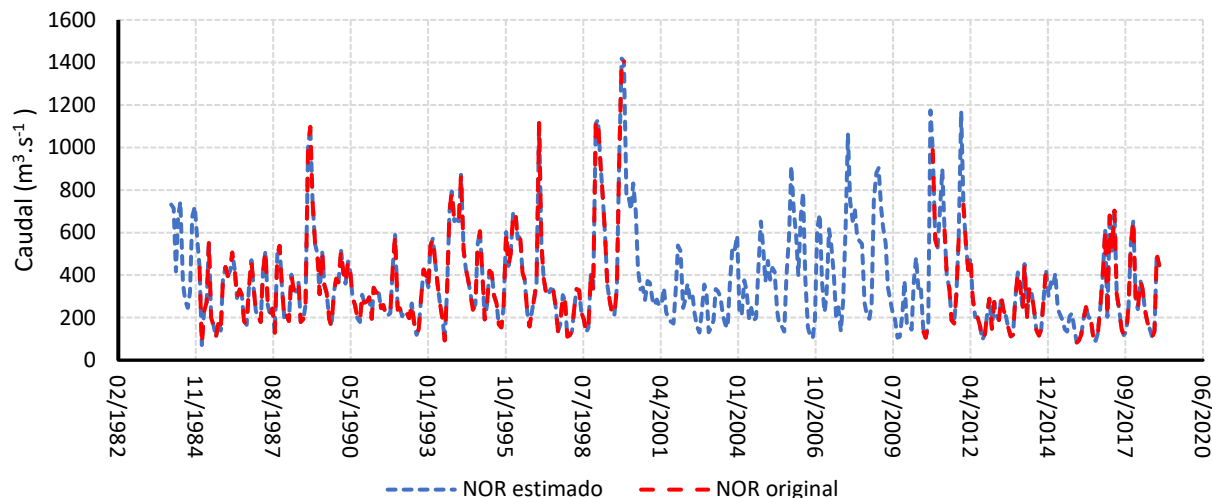


Figura 14. Serie temporal caudal medio mensual estación Los Nortes datos originales y estimados en el completado de datos

En la gráfica se observa en color rojo la serie temporal original y en azul la estimada, esta estimación considera todo el conjunto de datos de las 27 estaciones para recrear la información faltante. Para determinar su variación con respecto a los datos originales se calculó los estadísticos básicos con las series completas, con esta información se procedió a comparar el valor promedio del caudal en cada estación de la serie original y la estimada (ver Tabla 22), con esto se obtuvo que el error relativo el cual es inferior al 8%, lo cual se considera como un porcentaje de error bajo.

Tabla 22. Estadísticos básicos series completas de caudal y calculo error relativo

Subcuenca	ID	Promedio (m³.s⁻¹)	Máximo (m³.s⁻¹)	Mínimo (m³.s⁻¹)	Desv. Est (m³.s⁻¹)	CV	Dif abs	Error relativo %
GUAITARA	CAR	3.33	15.55	0.86	1.93	0.58	0.01	0.4
	YUN	6.81	32.32	0.51	5.01	0.74	0.11	1.6
	PIL	33.74	99.10	1.12	14.06	0.42	1.46	4.1
	SPE	55.03	190.10	3.92	23.82	0.43	0.03	0.1
	AGR	81.27	248.76	21.17	35.29	0.43	0.72	0.9
JUANAMBU	CEN	1.48	7.82	0.13	0.84	0.57	0.02	1.2
	UNI	3.34	10.30	0.80	1.55	0.46	0.02	0.6
	PRV	9.19	29.59	1.44	4.92	0.54	0.35	3.7
	PTJ	36.27	160.20	7.48	16.65	0.46	0.21	0.6
MAYO	CAN	13.54	46.30	4.04	5.29	0.39	0.09	0.7
GUACHICONO	PTF	21.60	84.53	3.62	12.47	0.58	0.11	0.5
	GCH	33.49	113.70	5.47	20.60	0.61	0.22	0.7
PATIA ALTO	PTC2	11.27	43.66	0.32	8.42	0.75	0.42	3.6
	PTT	25.83	111.40	1.78	18.29	0.71	1.33	4.9
	HYO	17.69	101.00	0.60	14.92	0.84	0.57	3.1
	SAJ	12.44	75.13	0.04	10.32	0.83	0.57	4.4
	FON	61.89	312.80	4.10	48.69	0.79	0.86	1.4
	PTC1	13.97	64.23	1.10	9.55	0.68	0.41	2.9
	PNP	141.92	640.74	10.39	107.89	0.76	3.78	2.7
PATIA MEDIO	PTG	219.20	876.90	41.07	141.33	0.64	10.48	5.0
	PTP	317.24	1006.00	75.83	175.16	0.55	16.29	5.4
	NOR	367.87	1418.00	70.94	226.82	0.62	18.33	5.2

Tabla 22. Estadísticos básicos series completas de caudal y calculo error relativo

Subcuenca	ID	Promedio (m ³ .s ⁻¹)	Máximo (m ³ .s ⁻¹)	Mínimo (m ³ .s ⁻¹)	Desv. Est (m ³ .s ⁻¹)	CV	Dif abs	Error relativo %
TELEMBI	VER	3.73	15.22	0.09	2.59	0.69	0.04	1.1
	SND	15.18	39.95	0.38	7.99	0.53	0.54	3.4
	SLI	377.65	1005.62	4.29	173.52	0.46	30.34	7.4

De la Tabla 22 se destacan los resultados de la estación Los Nortes la cual resume el caudal de las CRA (Patía Alto y Guátara) el cual registra un caudal medio de 368m³.s⁻¹. En cuanto a las CRP la estación que resume parte del caudal del río Telembí es la estación Sali la cual registra un caudal medio de 378m³.s⁻¹, cabe destacar que el área de la cuenca Patía hasta la estación Los Nortes es de 12,893km² y la estación Sali 1,756km², convirtiendo este dato en rendimiento se tiene para Los Nortes 28.19L/s*km² y para Sali 215.12L/s*km², lo cual es una clara muestra de la mayor oferta hídrica que proporciona la región Pacífico con respecto a la región Andina.

En cuanto a precipitación se presenta en la Figura 15 la serie temporal de precipitación de la estación Remolinos, la cual tienen un 9.3% de datos faltantes, en color rojo la serie original y en azul la serie estimada. En la Tabla 23 se presenta el cálculo del error relativo con respecto a la precipitación media el cual es inferior al 2% el cual se considera como un error bajo. De la Tabla 23 cabe resaltar que la estación con mayor precipitación media es la estación Barbacoas localizada en el municipio del mismo nombre en el departamento de Nariño, la cual presenta una precipitación total mensual media de 558mm.

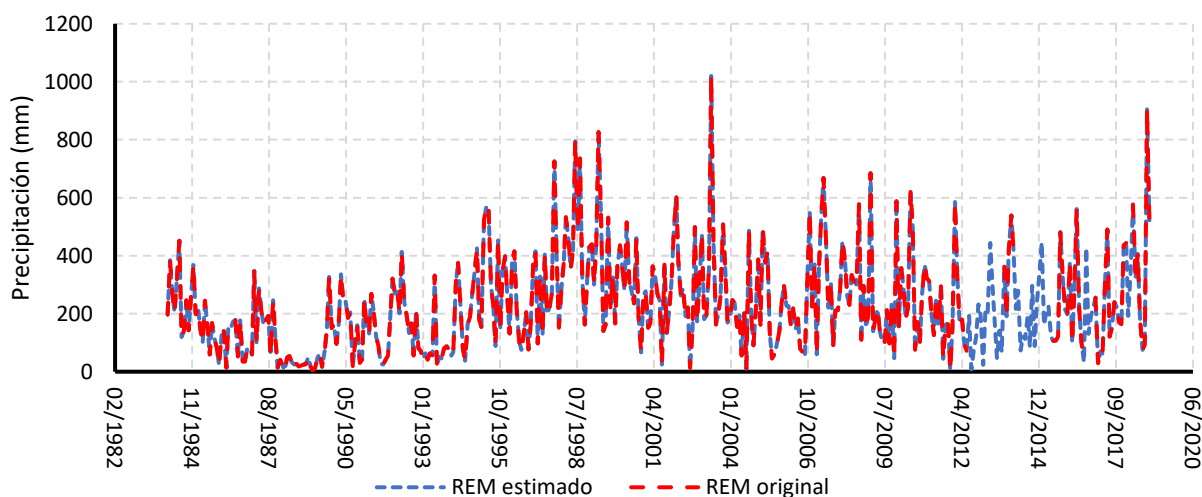


Figura 15. Serie temporal precipitación total mensual estación Remolino datos originales y estimados en el completado de datos

Tabla 23. Estadísticos básicos series completas de precipitación y calculo error relativo

Cuenca	ID	Promedio (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desv.Est (mm)	CV	Dif Abs	Error relativo %
CRP	VER	211.88	656.6	0	144.64	0.68	1.5	0.72
	SDE	381.23	1112.5	4.4	226.35	0.59	3.8	1.00

Tabla 23. Estadísticos básicos series completas de precipitación y calculo error relativo

Cuenca	ID	Promedio (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desv.Est (mm)	CV	Dif Abs	Error relativo %
CRP	BAR	558.17	1236.8	46.5	257.40	0.46	2.6	0.47
	MAG	407.93	1376.7	25	239.09	0.59	1.1	0.27
	SHA	398.40	1387	0	241.27	0.61	0.1	0.03
	REM	229.16	1020	3.7	163.23	0.71	4.2	1.81
	MOS	303.48	1256.3	0	202.15	0.67	3.7	1.23

6.1.2.3 Análisis de homogeneidad

Con las series de caudal y precipitación completas se realizó una serie de análisis para determinar si existen períodos de diferente comportamiento, se estudió la homogeneidad de los datos y se determinó si existe tendencia en los valores medios o cambios en la varianza de los datos. Para realizar este trabajo se utilizó el software R y el software Excel aplicando las metodologías descritas en el numeral 5.1.4. La información se presenta en forma de matriz donde se resume para cada estación si se acepta o rechaza las hipótesis nulas H_0 para cada una de las pruebas realizadas. Para las estaciones de caudal se pueden observar los resultados en la Tabla 24, de la misma forma se presentan los resultados para las estaciones de precipitación en la Tabla 25.

Con respecto a los caudales las pruebas muestran que en 8 estaciones presentan tendencia en la media, estas estaciones son: Yunguila, Bocatoma Centenario Universidad, Puente Fierro, Guachicono, Los Nortes, el Sande y Sali, esto se determina ya que se rechaza la hipótesis nula en tres o más de las cinco pruebas realizada para cambio en la media, estas estaciones rechazan la hipótesis en la prueba de Man Kendall principalmente con un grado de significancia de $\alpha=0.05$.

Con relación al cambio de la varianza se determina que en 11 estaciones se rechaza la hipótesis nula en la prueba F, las estaciones que presentan cambio en la varianza son: Yunguila, Pilcuán, Bocatoma Centenario Universidad, Providencia, Puente Juanambú, Puente Fierro, Guachicono, El hoyo, Puente Carretera Balboa, y el Vergel. Este cambio en la varianza se da partiendo las series en dos grupos con la mitad de los datos y comparando las varianzas de los dos grupos, esto significa que la amplitud de los datos varía entre cada grupo de datos y esta diferencia es estadísticamente significativa con un grado de significancia de $\alpha=0.05$.

Siguiendo el mismo procedimiento anterior se determinó para las estaciones de precipitación que 3 de las 7 estaciones presentan tendencia en la media, estas estaciones son: Magui, Salahonda y Remolino, esto se determina ya que se rechaza la hipótesis nula en tres o más de las cinco pruebas realizada para cambio en la media, estas estaciones rechazan la hipótesis en la prueba de Man Kendall principalmente con un grado de significancia de $\alpha=0.05$.

Con respecto al cambio de varianza solo la estación Mosquera rechaza la hipótesis nula en la prueba F con un grado de significancia de $\alpha=0.05$.

Tabla 24. Resultados pruebas de homogeneidad datos estaciones de caudal

I D	prueba T	Man Kendall	Cambios en Media- Prueba T	Cambio Media Mann Whitney	Cambio en la media-Abbe (Homog)	Cambio Varianza prueba F
C A R	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
Y U N	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
S P E	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
P I L	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
A G R	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
C E N	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
U N I	se rechaza hipótesis, por lo tanto $b \neq 0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
P R V	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
P T J	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
C A N	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
P T F	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
G C H	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
P T C 2	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
P T T	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$

Tabla 24. Resultados pruebas de homogeneidad datos estaciones de caudal

I D	prueba T	Man Kendall	Cambios en Media- Prueba T	Cambio Media Mann Whitney	Cambio en la media-Abbe (Homog)	Cambio Varianza prueba F
H Y O	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
S A J	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
F O N	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
P T C 1	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
P N P	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
P T G	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
P T P	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
N O R	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
V E R	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza
S N D	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
S A L I	se rechaza hipótesis, por lo tanto $b \neq 0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc es menor que $U1-\alpha/2$. Ho se confirma, no hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$

Tabla 25. Resultados pruebas de homogeneidad datos estaciones de precipitación

I D	prueba T	Man Kendall	Cambios en Media- Prueba T	Cambio Media Mann Whitney	Cambio en la media-Abbe (Homog)	Cambio Varianza prueba F
V E R	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
S D E	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
B A R	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
M A G	se rechaza hipótesis, por lo tanto $b \neq 0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
S H A	se rechaza hipótesis, por lo tanto $b \neq 0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
R E M	se rechaza hipótesis, por lo tanto $b \neq 0$	se rechaza hipótesis por lo tanto $b \neq 0$	Hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se acepta la hipótesis, no hay cambio en la varianza ya que $F(1-\alpha/2) \leq F_c \leq F(\alpha/2)$
M O S	La hipótesis se acepta y por lo tanto $b=0$	La hipótesis no se rechaza por lo tanto $b=0$	No hay cambio en la media a partir de 2001	Uc Mayor a $U1-\alpha/2$. Ho Se rechaza, hay cambio en la media	Ho se rechaza, hay cambio en la media	Se rechaza hipótesis hay cambio en la varianza

6.1.2.4 Análisis de tendencia

Con las estaciones establecidas que presentan tendencia se procede a realizar las pruebas para cuantificar la tendencia con la pendiente de Sen y el punto de cambio con la prueba de Pettitt. En la Tabla 26 se presentan los resultados para las estaciones de caudal y en la Tabla 27 los resultados para las estaciones de precipitación.

Tabla 26. Estimación de tendencia estaciones de caudal

ID	Prueba de tendencia de Mann-Kendall					Pendiente de Sen	Prueba de Pettitt para la detección de un solo punto de cambio		
	Z	P-value	S	varS	tau	m ³ /s – decadal	U*	P-value	Probable Punto de Cambio
YUN	-2.13	3.34E-02	-6116	8261198	-0.070	-0.33	6838	4.58E-02	199 - 1/7/2000
CEN	-2.11	3.51E-02	-6058	8260714	-0.069	-0.07	7913	1.27E-02	304 - 1/4/2009
UNI	4.27	1.99E-05	12261	8260999	0.139	0.25	12965	2.53E-06	249 - 1/9/2004
PTF	-2.06	3.95E-02	-5920	8261241	-0.067	-0.99	7037	3.66E-02	304 - 1/4/2009
PTC2	-2.13	3.30E-02	-6128	8261235	-0.070	-0.68	9684	1.02E-03	341 - 1/5/2012
NOR	-2.82	4.85E-03	-8098	8261283	-0.092	-22.52	10556	2.46E-04	340 - 1/4/2012
SND	-2.42	1.54E-02	-6962	8260893	-0.079	-0.94	9612	1.15E-03	340 - 1/4/2012
SALI	-5.04	4.62E-07	-14491	8261245	-0.165	-41.73	15752	3.93E-09	330 - 1/6/2011

De la Tabla 26 de forma general se puede afirmar que los valores de p-value son inferiores al 0.05, es decir que son estadísticamente significativas con un grado de significancia de $\alpha=0.05$. Las tendencias son negativas, es decir los caudales están disminuyendo resultado que coincide con lo reportado por, Carmona, A. & Poveda, G., (2014) en el estudio de tendencia de largo plazo en series hidroclimatológicas en Colombia, donde destacan que los caudales en el departamento de Nariño tienen una tendencia a disminuir su caudal. Únicamente la estación Universidad presenta una tendencia positiva la cual se considera baja ya que el incremento es de $0.25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ cada 10 años.

También se puede establecer que la estación Los Nortes y Sali las cuales corresponden con los mayores registros de caudal presentan tendencias marcadas, en Los Nortes se afirma que en esta estación cada 10 años el caudal medio disminuye $22.52 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, si comparamos el caudal medio de la estación el cual corresponde a $367.87 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, esto quiere decir que el caudal medio disminuye el 6% cada 10 años. De la misma forma para la estación Sali se afirma que en esta estación cada 10 años el caudal medio disminuye $41.73 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ si comparamos el caudal medio de esta estación el cual corresponde a $377.65 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, nos indica que el caudal medio disminuye el 11% cada 10 años. Para el resto de las estaciones la tendencia es baja.

De la prueba de Pettitt se estiman los puntos de cambio, principalmente marca en los años 2000, 2004 y 2009 a 2012, años en los cuales se presentaron fenómenos de LN y EN según el índice ONI de la NOAA, para el 2009 y 2004 se presentó eventos EN, para el 2000 y 2010 se presentaron eventos LN. Destacando la ola invernal a finales del 2010 y comienzos del 2011 la cual se ha catalogado como una de las más fuertes que se ha presentado en Colombia (CEPAL, 2013).

Tabla 27. Estimación de tendencia estaciones de precipitación

ID	Prueba de tendencia de Mann-Kendall					Pendiente de Sen	Prueba de Pettitt para la detección de un solo punto de cambio		
	Z	P-value	S	varS	tau	mm - decadal	U*	P-value	Probable Punto de Cambio
MAG	3.32	9.03E-04	9541	8261188	0.108	35.11	16069	1.74E-09	181 - 1/1/1999
SHA	3.93	8.48E-05	11298	8261229	0.128	44.38	11086	9.75E-05	165 - 1/9/1997
REM	4.44	8.98E-06	12764	8261211	0.145	28.90	19042	3.79E-13	130 - 1/10/1994

De la Tabla 27 de forma general se puede afirmar que los valores de p-value son inferiores al 0.05, es decir que son estadísticamente significativas con un grado de significancia de $\alpha=0.05$. Las tendencias son positivas, es decir las precipitaciones están aumentando resultado que coincide con lo reportado por Céron et al., (2022) y Carmona, A. & Poveda, G., (2014) establecieron en sus estudio que en algunas regiones existen tendencias positivas y negativas en cuanto a las precipitaciones en Colombia mostrando que el departamento de Nariño tiene tendencias positivas en la región pacífico y negativas en la región Andina. También se puede establecer que en la estación Salahonda la precipitación total mensual media aumenta 44.38mm cada 10 años, si comparamos la precipitación total media mensual la cual corresponde a 398.40mm, esto quiere decir que la precipitación se incrementa un 11% cada 10 años. Los porcentajes de incremento decadal para Maguá y Remolino son 9% y 13% respectivamente.

De la prueba de Pettitt se estiman los puntos de cambio, principalmente marca en los años 1994, 1997 y 1999, los cuales coinciden con eventos LN y EN según el índice ONI de la NOAA, para el año 1994 para el trimestre final se presentó EN, para 1997 el tercer semestre se presentó igualmente EN y para el primer trimestre de 1999 se presentó LN.

Esta información es relevante para los análisis de pronóstico, en este caso esta información es necesaria para determinar que estas tendencias están asociadas a fenómenos de variabilidad climática estacional y no a problemas de medición de los datos ya que se evidencian que el probable punto de cambio coincide con los fenómenos ENOS que causan cambios pequeños en la tendencia de los datos.

6.1.3 Caracterización Hidroclimatológica

Para la caracterización climática se utilizó estaciones representativas de la región andina y pacífica, tanto para caudales como precipitaciones.

6.1.3.1 Caracterización de caudales

Para esta caracterización se utilizaron los datos de las estaciones Puente Guasca (Patía Alto), Agroyaco (Guáitara), Los Nortes (Patía Medio) y Sali (Telembí), considerando que estas estaciones acumulan o representan el caudal total de las SZHs a las cuales pertenecen cada una de estas estaciones.

Conforme a lo presentado en la Tabla 28 y Figura 16 se establece que la estación Los Nortes ubicada en Patía Medio está en el extremo de las CRA y CRP, de acuerdo con la

gráfica del ciclo anual se observa un comportamiento mixto entre monomodal y bimodal, ya que se observa una época seca marcada en los meses agosto - septiembre, pero la segunda época seca que sería entre febrero - marzo es tenue, en cuanto a la época de lluvias se observa bien marcado en noviembre - diciembre, y en abril – mayo un pequeño incremento. El mismo comportamiento se observa en la estación Sali y la estación Puente Guasca. Para la estación Agroyaco se observa un comportamiento bimodal más marcado con periodos secos en febrero – marzo y agosto - septiembre, periodo húmedo noviembre - diciembre y abril - mayo.

Tabla 28. Ciclo anual caudales estaciones los Nortes (NOR), Sali (SAL), Puente Guasca (PTG) y Agroyaco (AGR)

NOR	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	1405	1130	943	899	831	700	428	333	342	675	1173	1418	1418
Promedio	506	392	399	452	439	320	258	189	157	251	489	563	368
mínimo	83	71	120	189	220	197	154	110	91	111	214	154	71
SAL	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	755	781	684	695	817	535	471	460	555	739	1006	853	1006
Promedio	466	391	383	422	433	310	220	212	271	419	503	502	378
mínimo	4	59	75	130	23	109	54	75	96	22	146	147	4
PTG	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	700	641	550	543	447	360	248	177	164	370	708	877	877
Promedio	309	254	249	270	252	186	141	103	80	133	301	350	219
Mínimo	41	58	69	105	82	89	46	52	44	48	112	66	41
AGR	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	197	162	186	181	179	249	123	84	89	101	174	249	249
Promedio	86	82	86	99	103	97	82	63	51	54	80	92	81
Mínimo	34	33	36	25	57	56	53	42	39	21	31	44	21

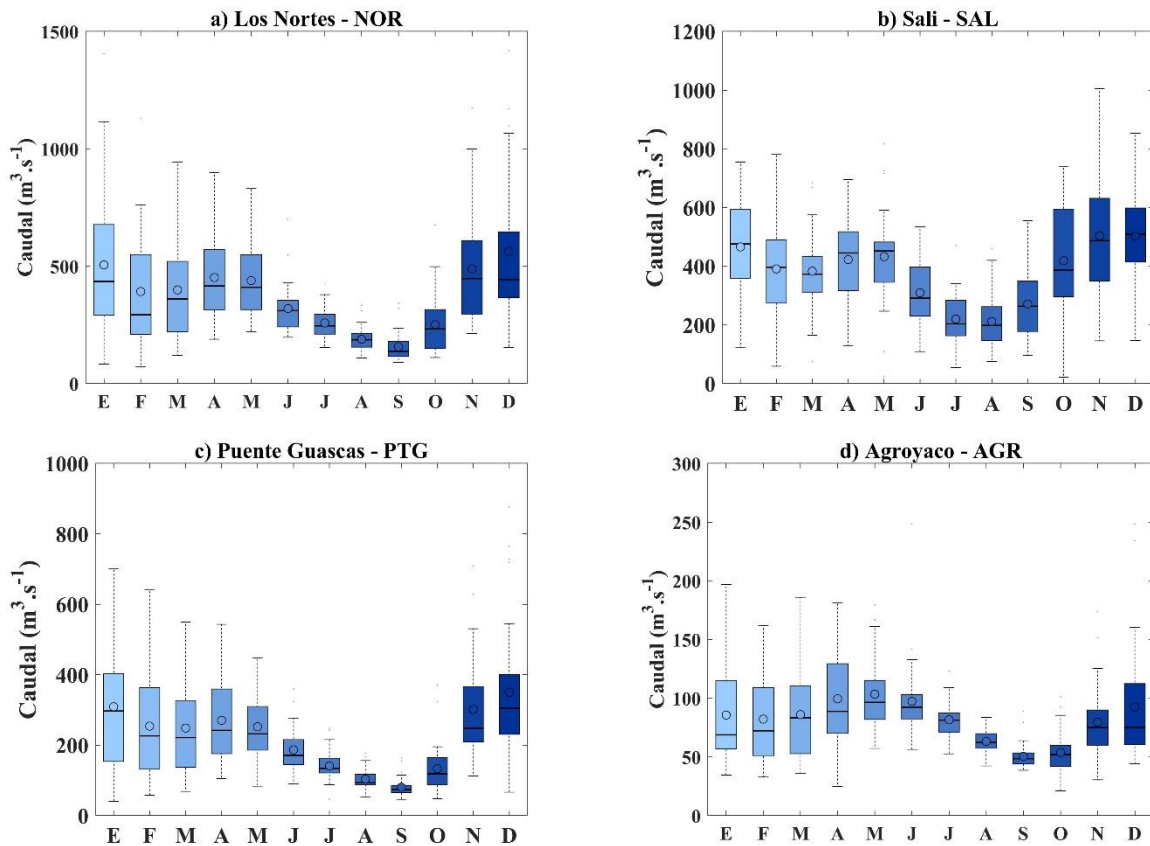


Figura 16. Ciclo anual estaciones, Los Nortes (a), Sali (b), Pte Guasca (c) y Agroyaco (d)

6.1.3.2 Caracterización de precipitaciones

Para la caracterización de las precipitaciones se toman algunas estaciones de las CRA como son: Rosas (ROS), La Guasca (GCA), Estrecho Patía (EPT), La Unión (UNI), Viento libre (VTL), Berruecos (BER) y Cumbal (CUM). Con estas estaciones se busca caracterizar la cuenca Alto Patía y la cuenca Guáitara.

Tabla 29. Ciclo anual precipitación total mensual multianual CRA río Patía

ROS	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	827	743	560	452	337	256	207	173	312	505	747	631	827.3
Medio	278	226	217	226	163	62	44	42	97	298	378	334	197.19
Mínimo	44	8	20	13	13	0	0	0	8	53	50	25	0
GCA	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	203	158	152	169	163	51	84	77	122	210	248	160	247.9
Medio	58	41	59	66	51	18	12	10	26	90	96	58	48.81
Mínimo	0	0	2.6	5	0	0	0	0	0	22.4	13.1	0	0
EPT	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	341	209	292	410	223	139	133	89	203	339	499	447	498.8
Medio	113	92	112	135	106	37	28	24	70	174	216	152	104.90
Mínimo	2	14	13	14	7	0	0	0	0	12	21	0	0
UNI	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	471	493	433	338	386	266	172	111	216	403	560	509	560
Medio	190	176	212	219	183	90	50	38	93	232	302	226	167.59
Mínimo	23	10	15	51	15	0	0	0	5	45	129	0	0
VTL	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	201	158	196	183	200	126	123	65	160	242	243	131	243.2
Medio	69	57	92	103	88	45	29	20	43	108	120	71	70.36
mínimo	3	7	7	27	23	6	0	0	1	22	36	1	0
BER	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	392	507	364	326	322	181	145	69	168	362	625	433	624.5
Medio	189	173	183	182	132	60	35	20	67	196	285	228	145.83
Mínimo	30	16	29	61	14	2	4	0	5	45	78	0	0
CUM	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	192	186	223	210	206	115	135	65	115	169	203	313	312.6
Medio	79	77	101	107	96	49	35	27	44	87	101	97	74.94
Mínimo	10	12	29	32	27	13	10	5	4	2	23	13	2.3

De la Tabla 29 y la Figura 17 se determina que la precipitación en la cuenca del Patía Alto tiene un régimen mixto de la misma forma como lo muestra el ciclo anual de caudales en la estación Puente Guasca (PTG) y Los Nortes (NOR), ya que se puede ver este mismo comportamiento en las estaciones ROS, VER, UNI y EPT, donde se presenta una época seca marcada en los meses julio - agosto, pero la segunda época seca que sería entre febrero - marzo es tenue, en cuanto a la época de lluvias se observa bien marcado en noviembre - diciembre, y en abril – mayo un pequeño incremento.

El resto de las estaciones GCA, VTL y CUM tienen el mismo comportamiento que el ciclo anual de la estación Agroyaco (AGR) la cual representa a la cuenca Guáitara. Este ciclo tiene un comportamiento bimodal más marcado con periodos secos en febrero – marzo y julio - agosto, periodo húmedo noviembre - diciembre y abril – mayo. Esta coincidencia en las dos subzonas hidrográficas es un claro indicativo que el ciclo anual de los caudales corresponde con el ciclo anual de las precipitaciones.

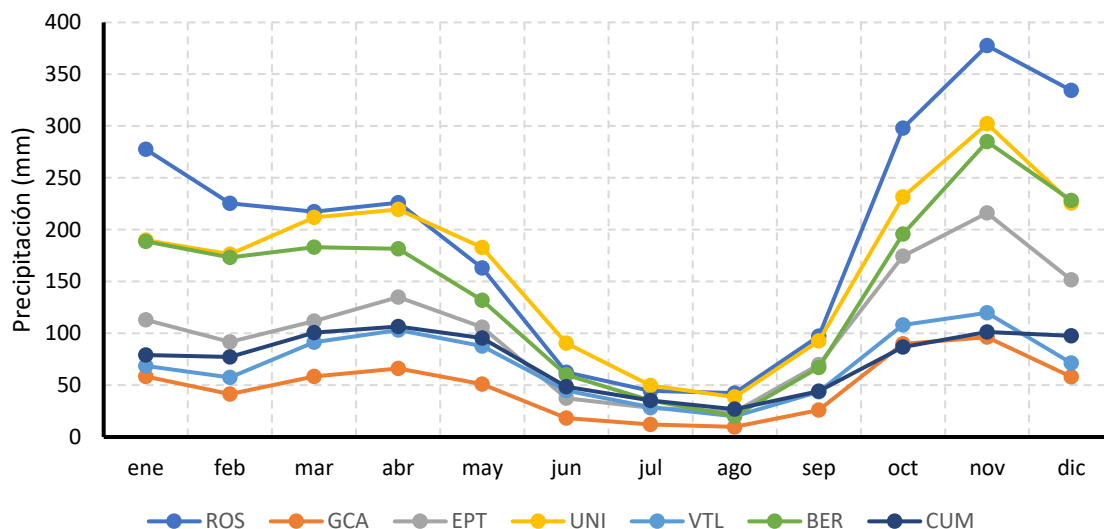


Figura 17. Ciclo anual de precipitación total media multianual estaciones CRA río Patía

Para la caracterización de las precipitaciones de CRP del río Patía se analizaron las estaciones El vergel (VER), El Sande (SDE), Barbacoas (BAR), Maguí Payan (MAG), Salahonada (SHA), Remolino (REM) y Mosquera (MOS). Con estas estaciones se busca caracterizar las cuencas Patía medio, Telembí y Patía Bajo.

Tabla 30. Ciclo anual precipitación total mensual multianual CRP río Patía

VER	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	632	495	438	445	432	234	305	217	316	513	657	620	656.6
Medio	303	222	240	236	216	96	63	53	121	308	346	339	211.88
Mínimo	13	57	58	19	28	11	2	0	8	88	154	16	0
SDE	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	898	759	1056	927	731	445	438	517	543	914	1113	911	1112.5
Medio	481	359	409	445	395	244	176	169	270	510	576	539	381.23
Mínimo	126	26	20	48	43	24	4	9	103	109	79	136	4.4
BAR	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	1008	1056	984	1168	1237	1071	1101	941	817	991	893	909	1236.8
Medio	597	507	584	812	878	633	477	378	458	509	376	488	558.17
Mínimo	278	172	156	374	383	175	118	47	145	119	87	198	46.5
MAG	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	760	796	906	1108	1137	1165	958	1377	1223	1032	822	792	1376.7
Medio	394	380	457	571	614	467	365	319	361	335	294	337	407.93
Mínimo	186	133	66	251	206	176	141	63	79	37	25	55	25
SHA	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	1102	735	902	991	1387	1144	1033	758	674	863	855	770	1387
Medio	496	367	279	403	624	551	411	334	292	337	305	383	398.40
Mínimo	56	49	0	49	80	56	24	51	22	52	30	39	0
REM	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	684	610	533	538	1020	625	799	578	735	725	906	589	1020
Medio	291	253	206	261	323	251	189	138	185	227	197	229	229.16
Mínimo	24	14	4	13	49	34	17	8	18	21	5	14	3.7
MOS	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
Máximo	1050	917	449	666	1197	709	763	549	811	740	1256	647	1256.3
Medio	419	258	194	308	462	351	264	184	250	323	325	304	303.48
Mínimo	129	23	0	46	135	108	10	0	34	89	17	20	0

De la Tabla 30 y Figura 18 se determina que la precipitación en las CRP del río Patía tiene un comportamiento bimodal en las estaciones VER y SDE época seca entre los meses de febrero – marzo y julio – agosto el cual es más severo, en cuanto a la época de lluvias se observa bien marcado en noviembre - diciembre, y en abril – mayo de menor magnitud. Es importante establecer que estas cuencas se encuentran en la parte alta de la cordillera occidental en la vertiente del Pacífico.

El resto de las estaciones BAR, MAG, SHA, REM, y MOS tienen un comportamiento monomodal con un pico claro de precipitaciones en los meses de abril – mayo descendiendo hasta el mes de agosto donde se presentan las precipitaciones mínimas, de este punto empieza a tener fluctuaciones pequeñas (subir y bajar la precipitación) prácticamente hasta los meses de enero – febrero donde vuelven a subir para alcanzar el pico en mayo.

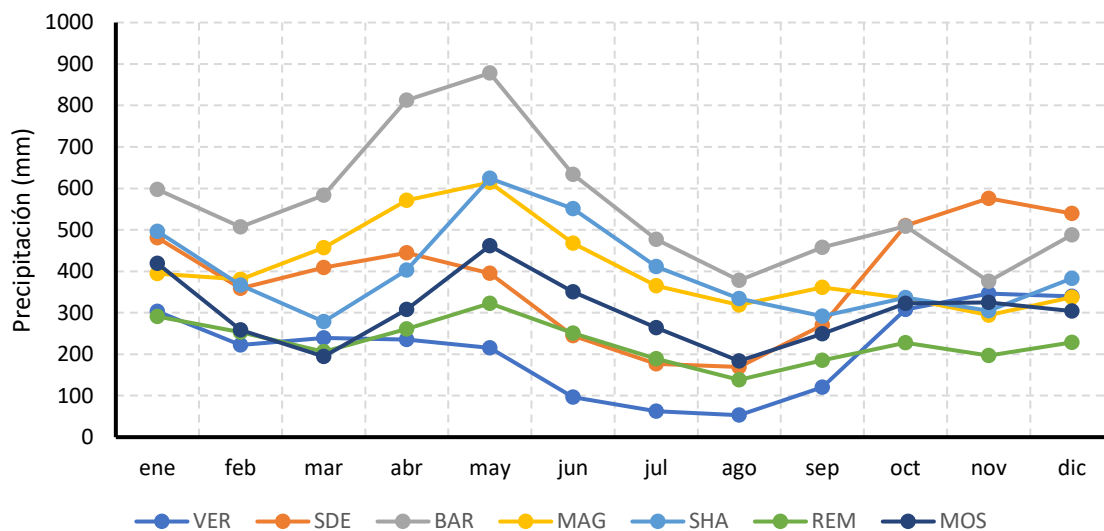


Figura 18. Ciclo anual de precipitación total media multianual estaciones CRP río Patía

6.1.4 Estimación de la oferta hídrica

En la cuenca de río Patía se cuenta con información de toda la región Andina, siendo la estación puente Guasca (PTG) que registra la información de caudales de la SZH del Alto Patía, la estación Agroyaco (AGR) registra la información de caudales de la SZH del río Guáitara, y la estación los Nortes toma la información de estas dos Subzonas hasta el corregimiento del Ejido en el municipio de Policarpa cerca de a la Hoz de Minamá. Para la región pacifica se tiene información de la cuenca del río Telembí con la estación Sali (SAL), configurándose estos (NOR y SAL) los últimos puntos de la cuenca río Patía con registros, quedando una amplia zona de la cuenca sin información hidrométrica.

Por esta razón es necesario cuantificar o estimar los caudales para toda esta zona del Pacífico, con lo cual se han planteado tres (3) metodologías para estimar el caudal medio mensual.

6.1.4.1 Transposición de caudales Río Mira

Partiendo de la ecuación general de caudal, donde se establece que es el volumen de escurrimiento (V) dividido entre el tiempo (T).

$$Q = \frac{V}{T} \quad (62)$$

Y considerando que el volumen que escurre depende de la precipitación (P) el número de curva (CN) y el área (A).

$$V = P * A * CN \quad (63)$$

Por lo tanto:

$$Q = \frac{P * A * CN}{T} \quad (64)$$

Con esto se pueden establecer otras posibles relaciones para asociar el caudal considerando otros aspectos como el tiempo de concentración y el CN y utilizando la relación descrita en la ecuación (38) se puede establecer que:

$$\frac{Q_c}{\frac{A_c P_c CN_c}{T_c}} = \frac{Q_s}{\frac{A_s P_s CN_s}{T_s}} \quad (65)$$

Al considerar que las precipitaciones son iguales o homogéneas se obtiene:

$$Q_s = Q_c \left(\frac{A_s * CN_s / T_s}{A_c * CN_c / T_c} \right)^n \quad (66)$$

La ecuación utilizada para la transposición de caudales corresponde a la ecuación (65) ya que esta considera otros aspectos no solo el área de la cuenca, sino también otras variables como el CN y el tiempo de concentración, con respecto al valor de n se asumió un valor de 0.5. Ya establecidas las variables a utilizar se procedió a determinar los parámetros morfométricos de la cuenca del río Mira, los cuales se describen en la Tabla 31.

El río Mira se encuentra en la región noroeste de Ecuador y suroeste de Colombia. Su nacimiento se localiza en el cerro Mirador, situado a una altitud aproximada de 3.500 metros en la cordillera de los Andes, dentro del cantón San Pedro de Huaca, en la provincia del Carchi. Inicia su recorrido como río Mirador y luego cambia su nombre a río Minas, posteriormente se denomina río Apaquí. Al unirse con el río Córdova, toma el nombre de río Chota y finalmente, al recibir las aguas del río Blanco en la zona de San Juan de Lachas, adopta su nombre definitivo “río Mira”. Durante su trayecto, el río Mira delinea el límite natural entre las provincias de Carchi e Imbabura, y más adelante, entre Carchi y Esmeraldas. Cuando se une al río San Juan atraviesa la frontera para adentrarse en la República de Colombia, donde recibe los ríos Nulpe y Guiza. Finalmente, desemboca en el cabo Manglares, cerca de la bahía de Tumaco (Gomez et al., 2017).

La cuenca que se delimito en esta investigación corresponde hasta la estación hidrométrica del IDEAM San Juan del Mira (MIR), otra estación de caudales dentro de la

cuenca es la estación Pipiguay (PIP), en la Figura 19 se encuentran representadas con el triángulo de color amarillo. Los puntos de color rojo son las estaciones pluviométricas consideradas en esta cuenca. Los puntos (P1,P2 y P3) corresponde a estaciones donde se están utilizando los datos de precipitación de CHIRPS. En la Figura 20a se presenta el histograma de caudales para el río Telembí, de igual forma en la Figura 20b y Figura 20c se presentan los resultados de las cuencas Patía Medio y Bajo respectivamente con esta metodología.

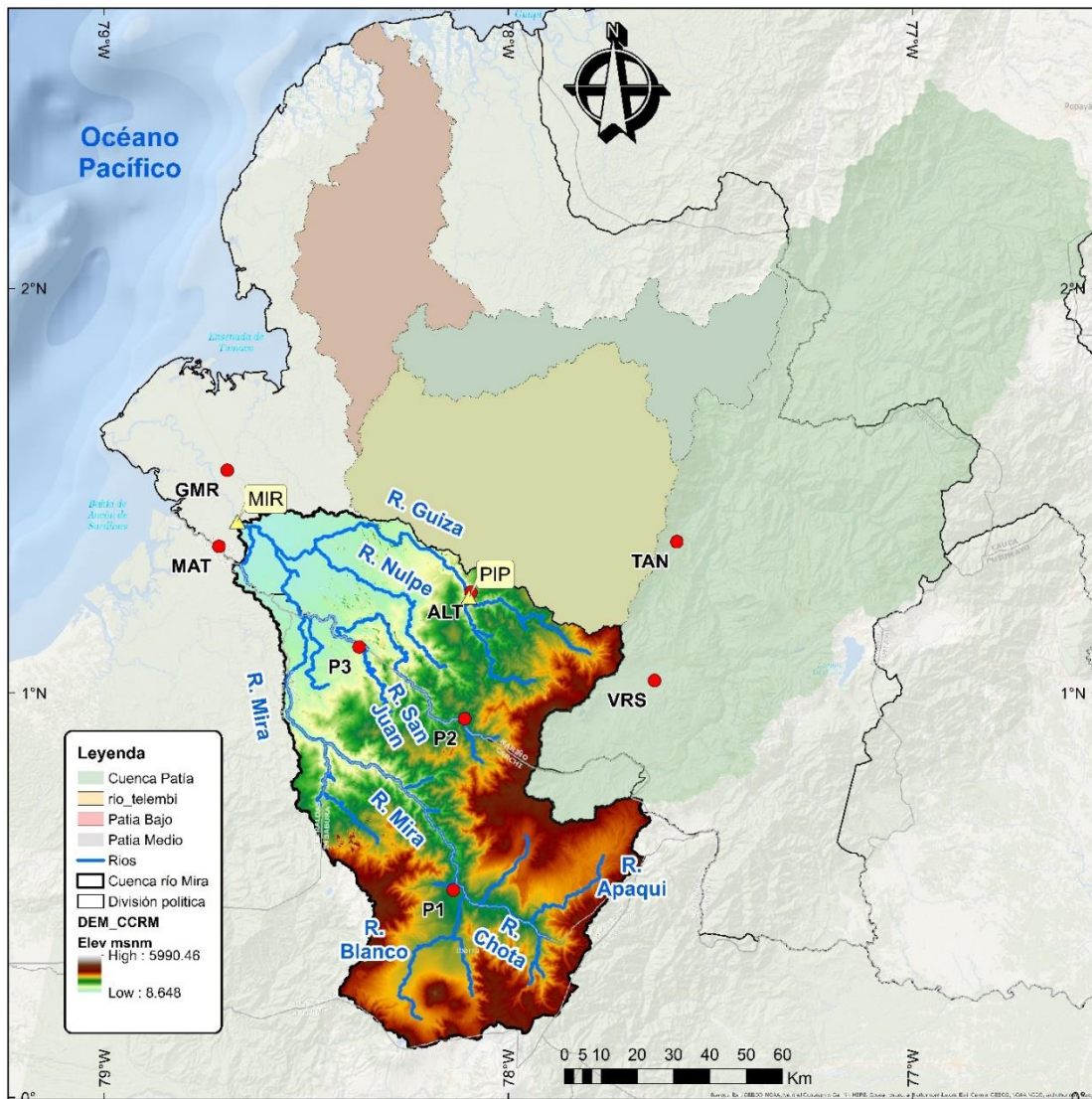


Figura 19. Cuenca río Mira hasta estación MIR
Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Parámetros morfométricos usados en la transposición de caudales cuenca río Mira (MIR)

CUENCA	A	ΣLi	Lc	S2	Sm	CN III	Tc
TLB	4581.46	5041.77	160.45	1.6	32.8	41	16.37
PMED	2137.47	527.22	124.90	0.2	34.8	47	28.45
PBAJ	2825.69	669.74	149.98	0.01	11.2	74	99.28
MIR	9972.12	9402.11	228.44	2.59	41.79	43	17.70

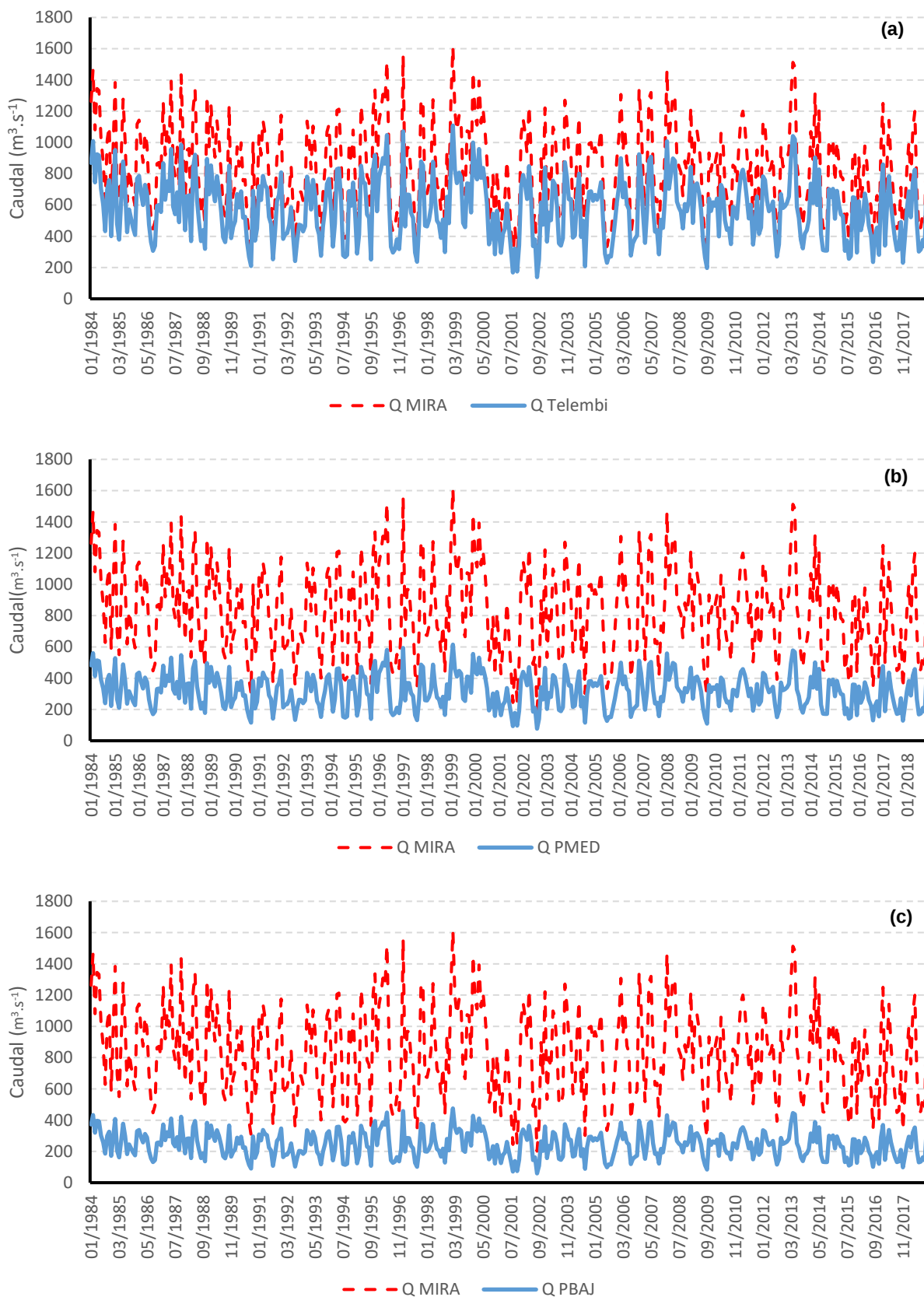


Figura 20. Histogramas de caudales transposición de caudales (a) Telembí, (b) Patía Medio (c) Patía Bajo

6.1.4.2 Método lluvia escorrentía SCS

Como primer paso es necesario obtener la precipitación media de cada una de las cuencas, para esto se realizó una distribución espacial de la precipitación, para la cuenca Patía media se utilizaron las estaciones MAG, BAR y VER. Para la cuenca Patía medio se utilizaron las estaciones MAG, BAR, VER y SDE, finalmente para la cuenca Patía bajo se utilizaron las estaciones MAG, MOS, SHA, BAR y REM (ver Figura 21).

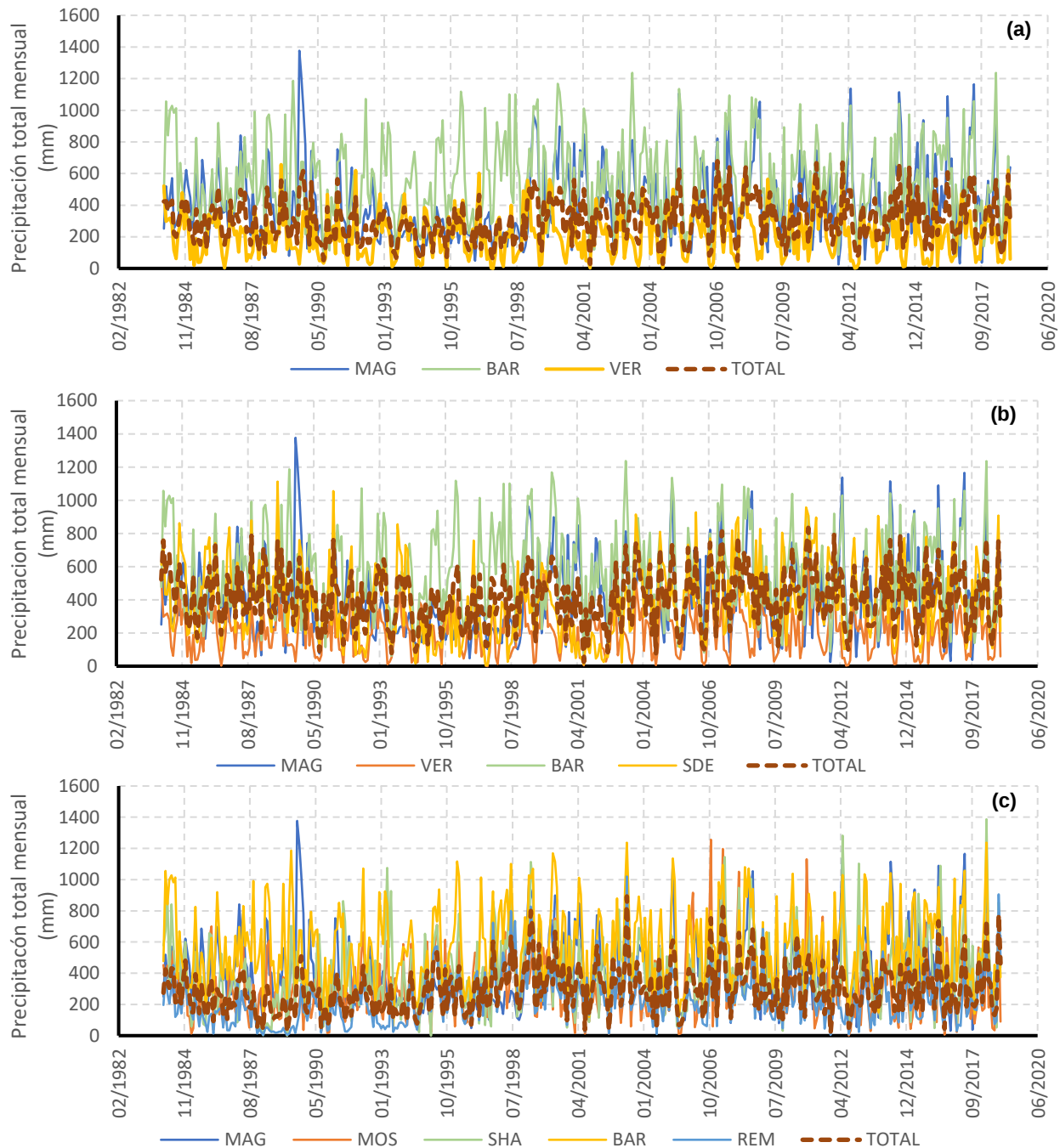


Figura 21. Precipitación media por subcuenca (a) Patía Medio, (b) Telembí y (c) Patía Bajo

Seguidamente se procedió a determinar el caudal de estas subcuencas, para lo cual se aplicó la metodología descrita en el numeral 5.1.6.2, donde se obtiene la escorrentía directa y para pasar a caudal se transforma aplicando el hidrograma unitario del SCS, de esta forma se obtienen los caudales, en la Tabla 32 se presentan los datos usados y en la Figura 22 se presentan los histogramas de caudales obtenidos para las tres subcuencas.

Tabla 32. Parámetros método SCS

Cuenca	CN III	Área km ²	Tc Horas	S mm	Ia mm	De hr	De min	t lag hr	t lag min	Tp hr	Tb hr
PMED	47	2137.47	31.42	286.43	57.29	0.31	18.85	18.85	1131.12	19.01	50.75
TLB	41	4581.46	21.35	365.51	73.10	1.07	64.05	12.81	768.60	13.34	35.63
PBAJ	74	2825.69	90.90	89.24	17.85	0.91	54.54	54.54	3272.40	54.99	146.84

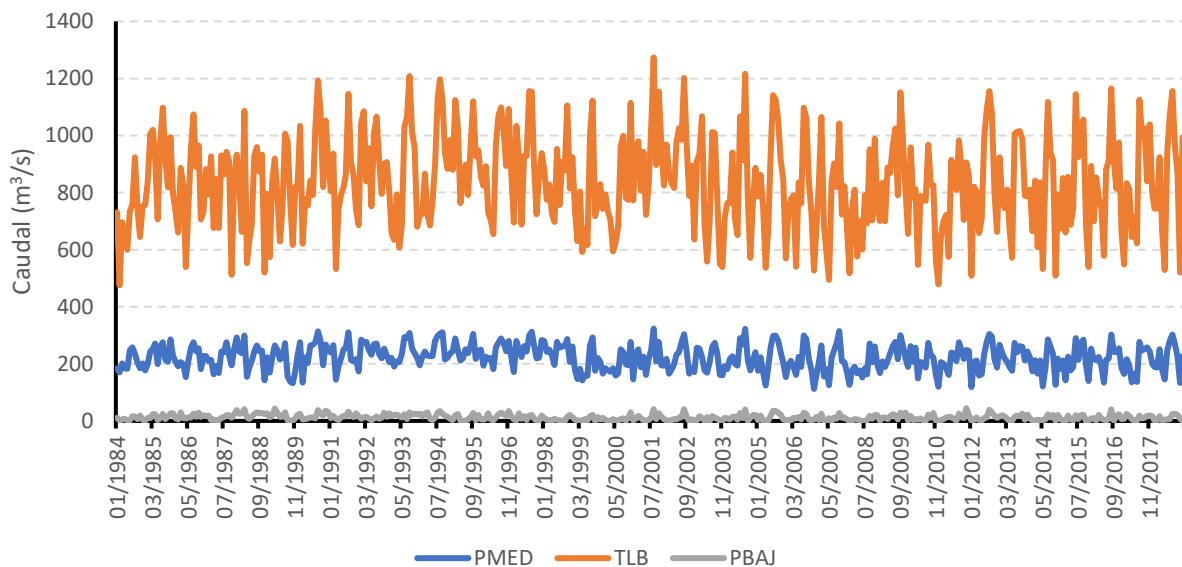


Figura 22. Histogramas de caudales método SCS

6.1.4.3 Modelo de Thomas

Este modelo se implementó para la cuenca del río Mira, se calibró y validó para esta cuenca donde se determinaron los parámetros a, b, c y d, posteriormente se aplicó este modelo para las condiciones de precipitación y evapotranspiración en las cuencas PMED, TLB y PBAJ.

Como primer paso se determinó la precipitación media (ver Figura 23a) y la evapotranspiración (ver Figura 23b). Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizó el metodología de Turc la cual tiene muy buen ajuste a datos medios medidos en campo junto con la ecuación de Penman en la validación de metodologías tanto para Colombia como en estudios desarrollados en Chile (Gómez & Cadena, 2017; Sánchez Martínez & Carvacho Bart, 2011).

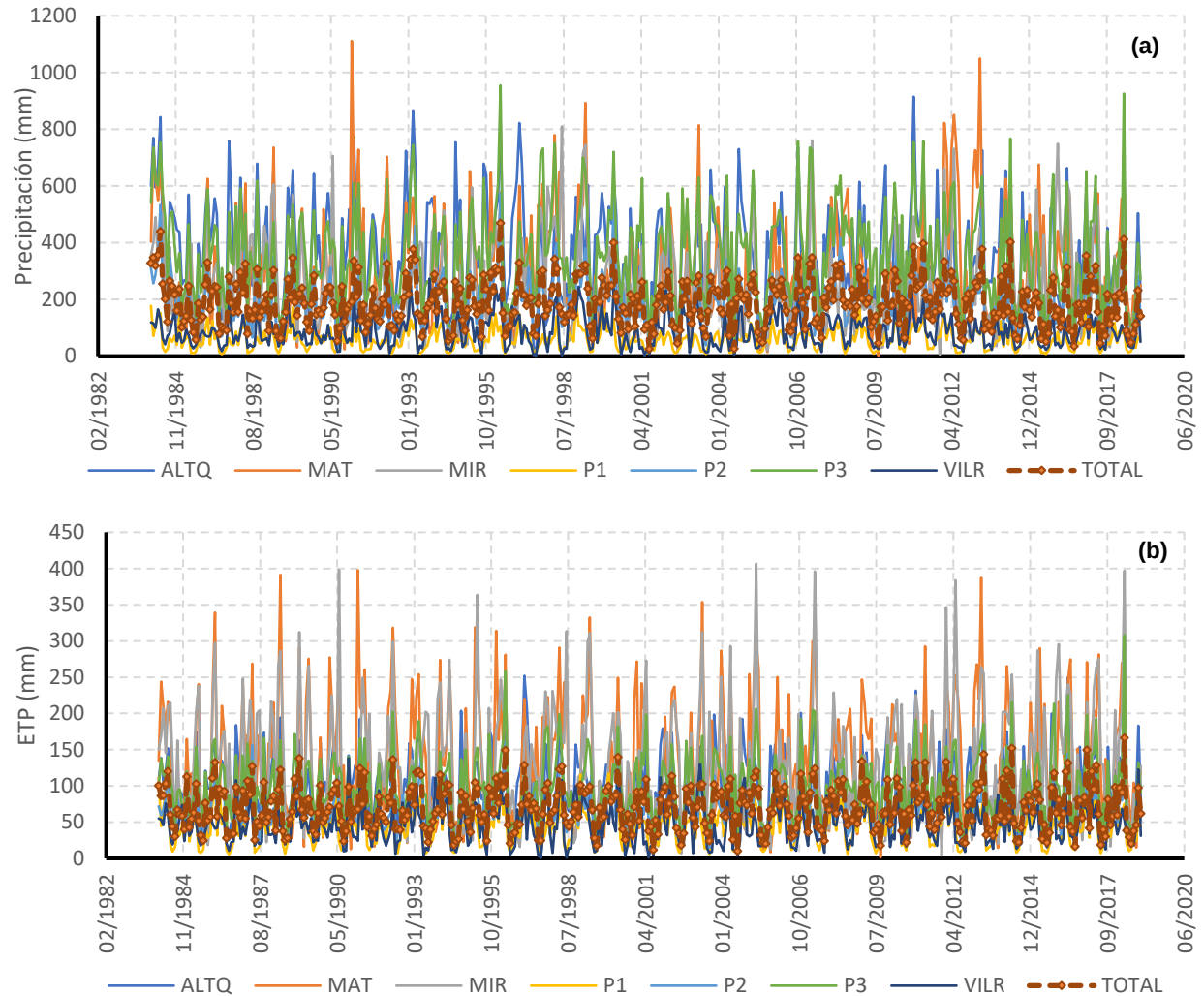


Figura 23. Precipitación (a) y evapotranspiración (b) media de la cuenca Río Mira

Ya con esta información se procede a determinar los parámetros a, b, c y d del modelo los cuales inicialmente se adoptan valores determinados en el estudio de Loaiza (2016) los cuales se fueron ajustando con calibraciones sucesivas aplicando la herramienta solver en Excel, hasta encontrar que las ecuaciones de bondad de ajuste reporten valores satisfactorios, este procedimiento se realizó con la mitad de los datos, reservando los restantes para realizar la validación del modelo (ver Figura 24).

De acuerdo con Loaiza (2016) se tiene que los parámetros a y b son los parámetros más sensibles del modelo, pero también los factores Sw_0 y Sg_0 resultan importantes para definir el estado inicial del modelo, en este caso el valor inicial de Sw_0 fue cero se corrió el modelo y en la medida que se obtenían resultados se fue adoptando el valor medio de toda la serie de calibración, el valor de Sg_0 se inició con un valor de 200 en la medida que este valor se incrementa los caudales aumentan y se revisaban las funciones de bondad de ajuste, mediante un proceso de tanteos sucesivos se encontró un valor satisfactorio en 9,210. El valores de Q_0 es el caudal medio simulado y A es el área de la cuenca en km^2 . En la Tabla 33 se presentan los valores de las variables obtenidas.

Tabla 33. Parámetros modelo de Thomas (a, b, c, d)

Parámetros	Datos entrada
a= 0.0001	Sw ₀ = 270
b= 794.9772	Q ₀ = 861
c= 0.0001	Sg ₀ = 9210
d= 0.008128	A = 9972.15

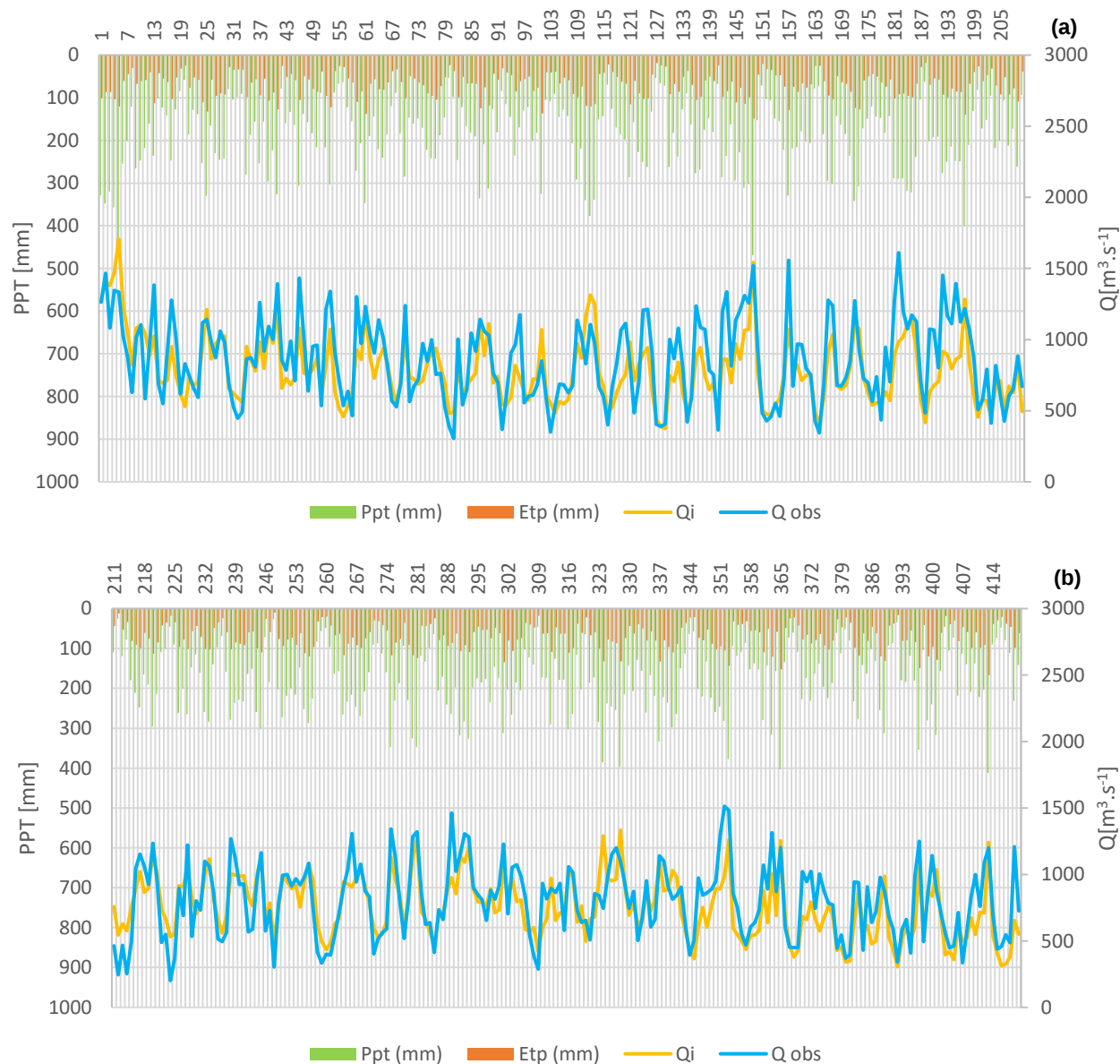


Figura 24. Calibración (a) y validación (b) del modelo cuenca río Mira

Tabla 34. Niveles de desempeño estadístico calibración modelo Thomas cuenca río Mira

Función	Calibración		Validación	
	Valor	interpretación	Valor	interpretación
NSE	0.53	Satisfactorio	0.59	Satisfactorio
RSR	0.68	Satisfactorio	0.64	Satisfactorio
PBIAS	8.59	Muy Bueno	6.10	Muy Bueno
R	0.60	Satisfactorio	0.62	Satisfactorio

En la Figura 24(a) se observa la calibración y la Figura 24(b) la validación del modelo, de forma general se aprecia que los datos observados de precipitación y caudal coinciden en sus picos de buena forma, lo cual es un buen indicador y que la especialización de la precipitación se realizó de manera correcta, además los resultados de las métricas de desempeño del modelo del río Mira son satisfactorias siendo el estadístico PBIAS el de mejor resultado. Otro aspecto importante es que la validación dio mejores resultados que la calibración.

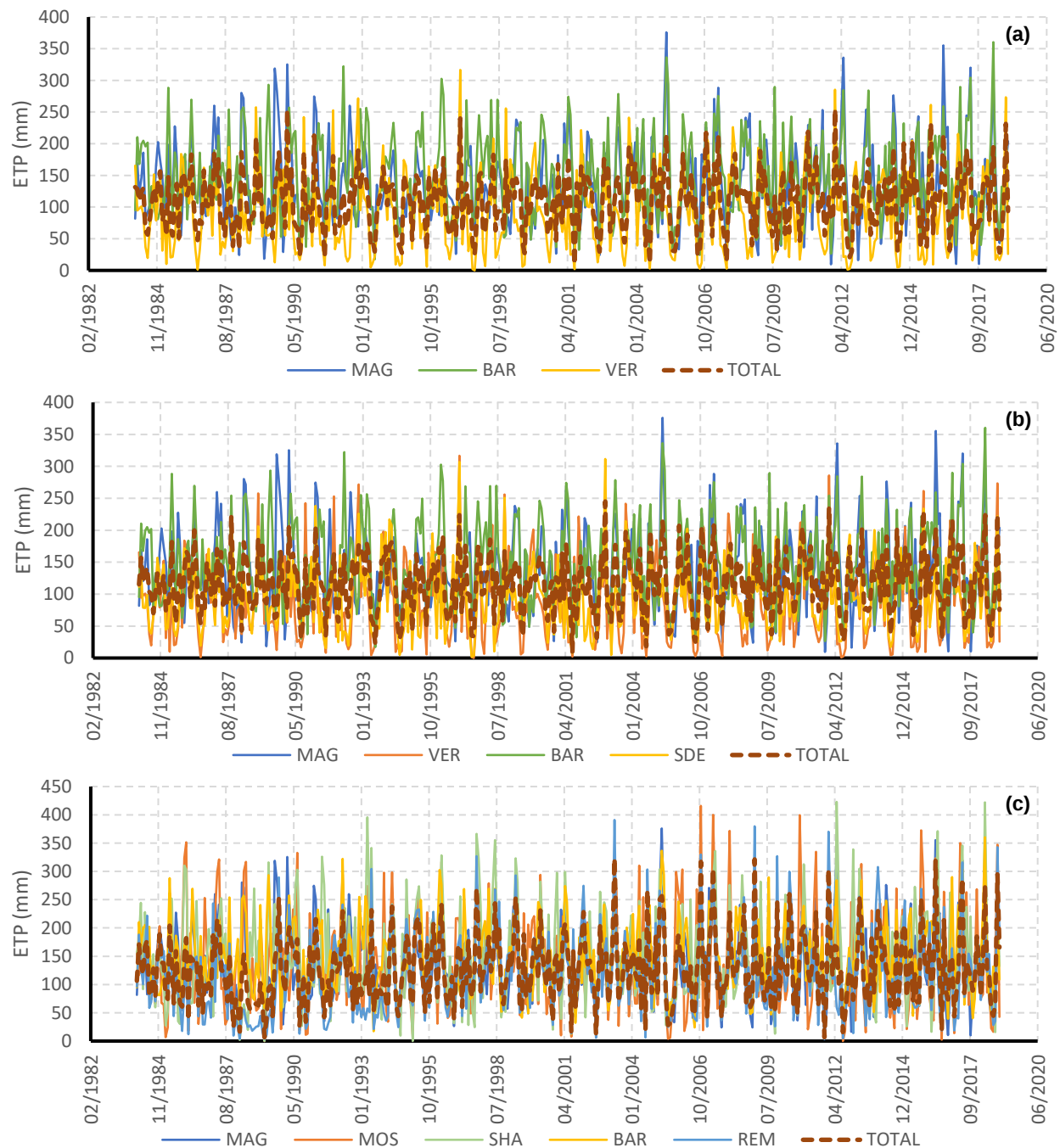


Figura 25. Evapotranspiración media por subcuenca (a) Patía Medio, (b) Telembí y (c) Patía Bajo

Para determina los caudales en las cuencas PMED, TLB y PBAJ fue necesario establecer los valores de la evapotranspiración para cada subcuenca, los cuales se presentan en la Figura 25 (a), (b) y (c) respectivamente. Finalmente y con los valores de los parámetros del modelo de Thomas establecidos, se procedió a calcular los caudales los cuales se presentan en forma gráfica en la Figura 26 (a), (b) y (c) los cuales corresponden a los histogramas de caudales para las cuencas PMED, TLB y PBAJ.

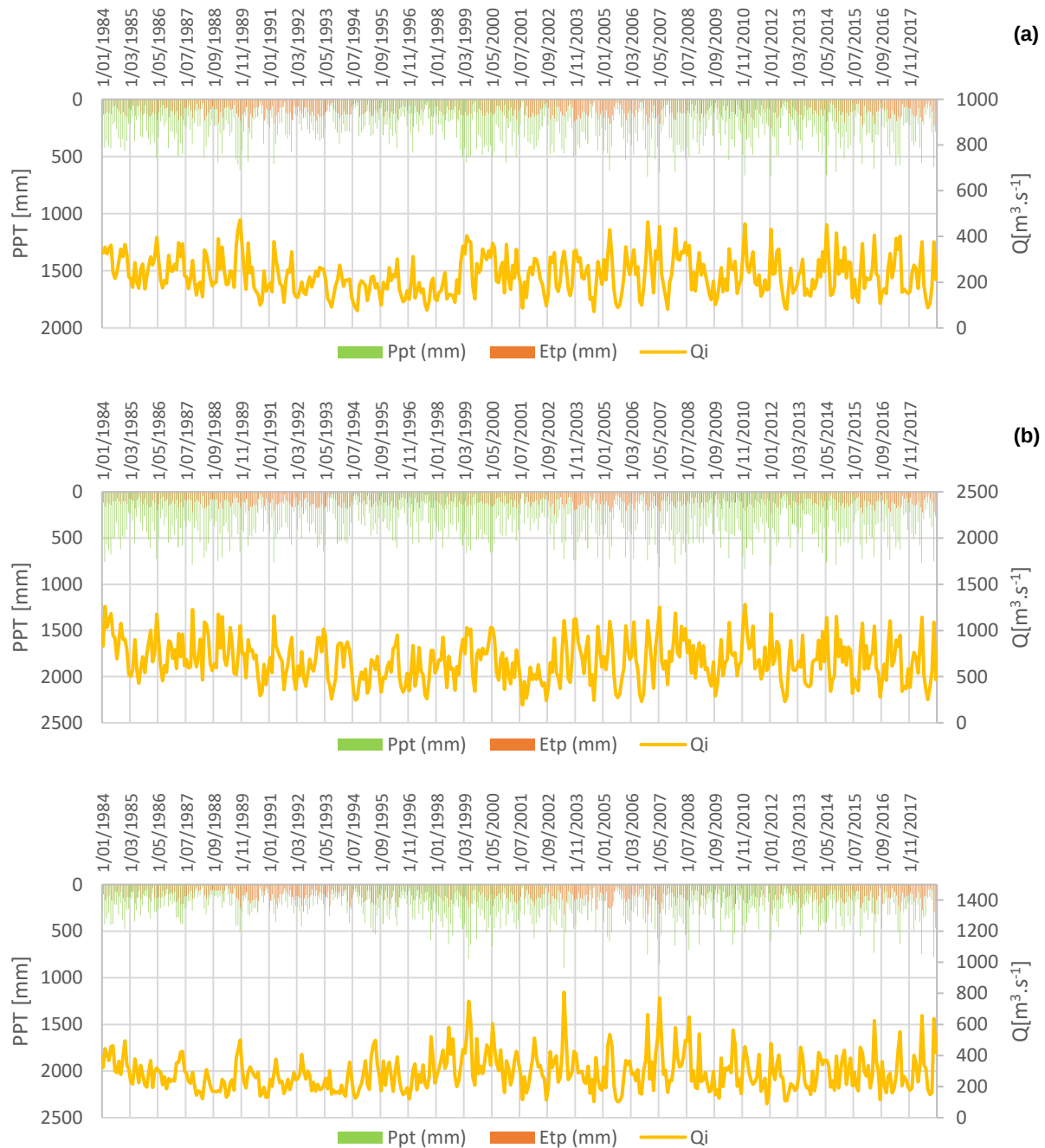


Figura 26. Histogramas de caudal modelo Thomas por subcuenca (a) Patía Medio, (b) Telembí y (c) Patía Bajo

Para determinar cuál de estos métodos empleados es el seleccionado para realizar el análisis de correlación se procedió a comparar los resultados con los datos establecidos por IDEAM (2019), en la Tabla 35 se presentan los resultados del cálculo de oferta hídrica para la cuenca del río Patía establecidos por el IDEAM en el estudio nacional de agua 2018 (ENA 2018).

Tabla 35. Oferta hídrica ENA 2018

Zona hidrográfica szh	Área km ²	Oferta anual			Caudal			Rendimiento		
		medio Mm ³	Seco Mm ³	Húmedo Mm ³	medio m ³ .s ⁻¹	Seco m ³ .s ⁻¹	Húmedo m ³ .s ⁻¹	medio L/s*km ²	Seco L/s*km ²	Húmedo L/s*km ²
Río Patía Alto	3,218	3,019	855	6,728	96	27	213	29.7	8.4	66.3
Río Guachicono	2,626	1,679	601	3,666	53	19	116	20.3	7.3	44.3
Río Mayo	874	660	299	1,304	21	9	41	23.9	10.8	47.3
Río Juanambú	1,084	1,228	558	2,812	39	18	89	35.9	16.3	82.3
Río Guáitara	3,650	2,498	972	5,392	79	31	171	21.7	8.4	46.8
Río Patía Medio	2,890	5,096	2,469	10,279	162	78	326	55.9	27.1	112.8
Río Telembí	4,635	20,509	8,355	39,267	650	265	1,245	140.3	57.2	268.6
Río Patía Bajo	4,527	14,026	5,692	28,808	445	180	913	98.2	39.9	201.8
Total Patía	23,504	48,714	19,801	98,255	1,545	628	3,116	65.7	26.7	132.6

Fuente: IDEAM (2019)

Mm3: Millones de metros cúbicos

A continuación, se prestan los resultados por subcuenca y su comparación con los resultados del ENA 2018.

Resultado Patía medio

Para la cuenca PMED (ver Figura 19) se delimito un área de 2,137 km², el ENA 2018 reporta un área de 2,890 km² esto es una diferencia de 26%, en la Tabla 36 (a) el menor porcentaje de error es para el método SCS tanto para el rendimiento como para el caudal. Se observan porcentajes altos de error a pesar de que el rendimiento de caudales elimina la variable área este error persiste posiblemente debido a que las metodologías utilizadas adoptan características de zona pacífico y esta zona es de transición.

Resultado Telembí

Para la cuenca TLB (ver Figura 19) se delimito un área de 4,581 km², el ENA 2018 reporta un área de 4,635 km² esto es una diferencia de 1.1%, en la Tabla 36 (b) el menor porcentaje de error es para el método del Modelo de Thomas tanto para el rendimiento como para el caudal. En esta cuenca los porcentajes de error son menores y esto es consecuencia de una diferencia mínima de área.

Resultado Patía bajo

Para la cuenca PBAJ (ver Figura 19) se delimito un área de 2,825 km², el ENA 2018 reporta un área de 4,527 km² esto es una diferencia de 37%, en la Tabla 36 (c) el menor porcentaje de error es para el método del Modelo de Thomas tanto para el rendimiento como para el caudal. Los resultados muestran que en cuanto al rendimiento de caudales el porcentaje de error es menor, ya que se elimina la variable área dando un mejor ajuste a los resultados del ENA 2018.

Para determinar el error total se realizó la adición de caudales y áreas para tener el caudal total de la cuenca el cual se puede ver de forma gráfica en la Figura 27, en la Tabla 37 se presenta los resultados obtenidos y el cálculo del error con respecto al ENA 2018. Los resultados muestran que el menor porcentaje de error para el caudal total es para el método de transposición de caudales del río Mira, con una diferencia mínima le sigue el método del Modelo de Thomas y el mayor error es el método del SCS, en cuanto al rendimiento se observa que el menor error es para el Modelo de Thomas. El área total delimitada en esta investigación fue de 22,592 km² mientras que el ENA 2018 reporta un área de 23,504 km² para una diferencia de 4%. Con estos resultados se establece que los valores del modelo de Thomas son los del mejor ajuste, por lo tanto estos serán considerados en el análisis de correlaciones.

Tabla 36. Cálculo de error caudales estimados con respecto al ENA 2018 para la cuenca PMED(a), TLB(b) y PBAJ(c)

Cuenca PMED (a)								
Método	Oferta estimada		Oferta ENA 2018		Error			
	Q prom m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q Abs.	Q Rel	R Abs	R Rel
PTM SCS	222.11	76.90	161.61	55.9	60.50	37.44%	21.00	37.56%
PTM TMIRA	317.19	109.81			155.58	96.27%	53.91	96.45%
PTM MODEL	230.15	79.68			68.54	42.41%	23.78	42.54%
Cuenca TLB (b)								
Método	Oferta estimada		Oferta ENA 2018		Error			
	Q prom m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q Abs.	Q Rel	R Abs	R Rel
TLB SCS	835.70	182.41	650.33	140.3	185.37	28.50%	42.10	30.01%
TLB TMIRA	571.71	124.79			78.62	12.09%	15.52	11.06%
TLB MODEL	672.85	146.86			22.52	3.46%	6.56	4.67%
cuenca PBAJ (c)								
Método	Oferta estimada		Oferta ENA 2018		Error			
	Q prom m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q Abs.	Q Rel	R Abs	R Rel
PBAJ SCS	12.5	4.41	444.77	98.25	432.31	97.20%	93.84	21.10%
PBAJ TMIRA	245.0	86.69			199.80	44.92%	11.55	2.60%
PBAJ MODEL	290.7	102.89			154.03	34.63%	4.64	1.04%

Tabla 37. Cálculo del error total para la cuenca Patía

Método	Oferta estimada		Oferta ENA 2018		Error			
	Q prom m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q m ³ .s ⁻¹	R L/s*km ²	Q Abs.	Q Rel	R Abs	R Rel
TOTAL MODEL	1561.61	66.36	1544.72	65.72	16.89	1.09%	0.64	0.97%
TOTAL SCS	1438.14	63.66	1544.72	65.72	106.58	6.90%	2.06	3.14%
TOTAL TMIRA	1533.75	67.89	1544.72	65.72	10.97	0.71%	2.17	3.30%

Q: Caudal; R: rendimiento; Abs: Absoluto; Rel: Relativo

De acuerdo con el estudio de Velásquez, M. & Poveda, G., (2019) quienes estimaron el balance hídrico de la región Pacífica Colombiana, determinaron que para la cuenca Patía el caudal total es de 1,210.6 m³.s⁻¹, considerando las precipitaciones de CHIRPS y 1,367.7 m³.s⁻¹ considerando las precipitaciones de TRMM (por sus siglas en ingles Tropical Rainfall Measuring Mission) para el periodo de 1982 a 2008, obteniendo un error relativo de 16.7% y 5.9% respectivamente con el ENA (2014), el cual reporto un caudal medio anual de 1,453 m³.s⁻¹. La presente investigación con las metodologías aplicadas tiene una mayor aproximación al ENA (2018), sin embargo estos resultados se pueden catalogar como aproximados ya que sus diferencias no superan el 25% con la única

fuentes oficiales que en este caso es el IDEAM, y al no contar con información hidrométrica que permita contrastarlos no se puede establecer cual resultado es mejor.

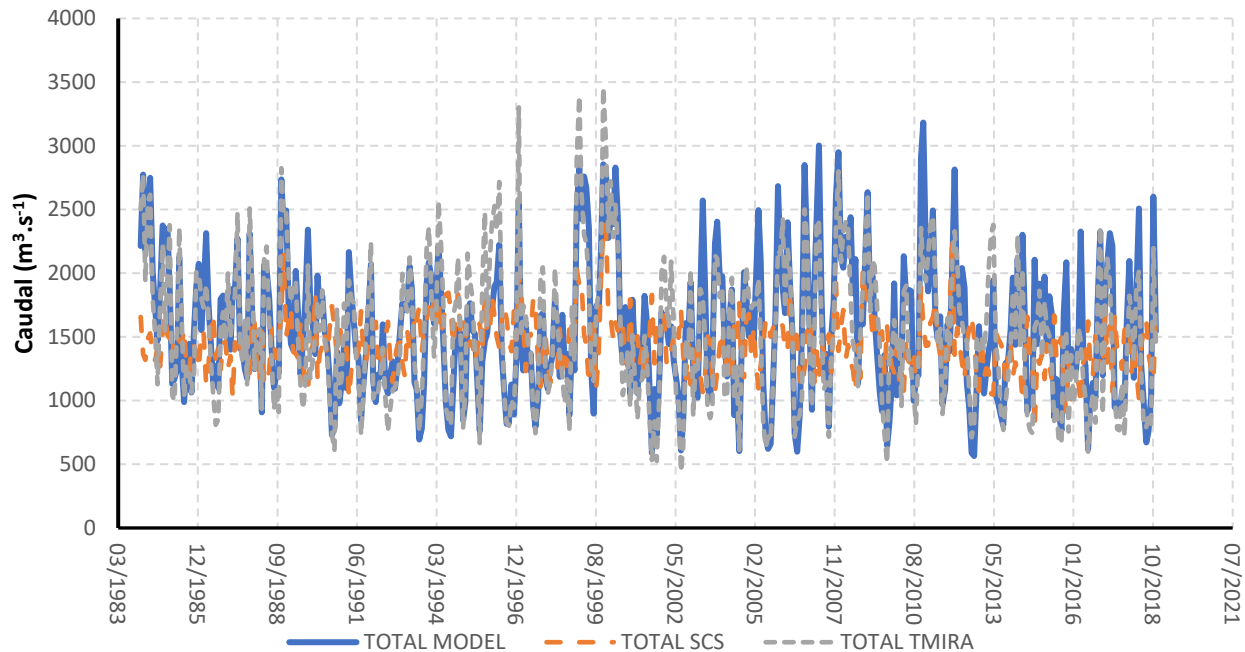


Figura 27. Histograma de caudal total cuenca río Patía

6.2 Objetivo 2

6.2.1 Correlaciones entre caudal e índices macroclimáticos – ENOS

Para establecer la influencia de índices climáticos de gran escala sobre los caudales de las principales SZH que conforman las CRA – Patía (Guátara, Patía Alto) y CRP – Patía (Patía Medio, Telembí y Patía Bajo) se correlacionaron los caudales mensuales de las estaciones con 10 índices océano-atmosféricos de gran escala vinculados con el fenómeno ENOS. Las correlaciones de todas las estaciones con los 10 índices macroclimáticos se muestran en la Tabla 38 y en la Figura 28, se destacan los resultados de 6 índices macroclimáticos con mayor influencia sobre los caudales de CRA – Patía y CRP – Patía.

De la Figura 28, se puede observar que las correlaciones para CRA – Patía y CRP-Patía son estadísticamente significativas negativas (positivas) con los índices ONI, MEI, Niño 3+4 y Niño 4 (SOI y TNI) indicando una relación inversa (directa) entre los índices y los caudales mensuales registrados en la cuenca, sin embargo se resalta que las correlaciones son menores con los caudales de la CRP-Patía lo que deja en evidencia una influencia débil del fenómeno ENOS sobre la variabilidad de caudales de las SZH que componen esta región como son Patía medio, Telembí y Patía Bajo. La relación inversa indica que un aumento (disminución) de los caudales están relacionados con el enfriamiento (calentamiento) del océano Pacífico Tropical, es decir con la ocurrencia de los eventos LN (EN) del fenómeno ENOS (Ashok & Yamagata, 2009).

Los resultados coinciden con estudios realizados por Carvajal et al., (1999), Poveda et al., (1998), Canchala et al., (2020c) y Triana (2021) quienes reportaron incremento (reducción) de caudales y precipitaciones asociados con valores negativos (positivos) de los índices ENOS. Adicionalmente, estos resultados son coherentes con análisis de precipitaciones en el departamento de Nariño realizados por Canchala et al., (2020a) quienes reportaron que la influencia de ENOS sobre la precipitación de la Región Andina es alta y registra un comportamiento similar al registrado por la mayor parte del territorio colombiano, mientras que la relación de ENOS con las precipitaciones de la Región Pacífico es débil.

De acuerdo con lo presentado en la Figura 28 las mayores correlaciones se presentan con el índice SOI el cual correlaciona valores de presión atmosférica obtenidos en el Pacífico occidental con los del Pacífico central. La existencia de valores negativos sostenidos del SOI indican episodios del fenómeno de EN. Los valores positivos del SOI se asocian con vientos fuertes del Pacífico y un calentamiento del mar al norte de Australia, popularmente llamado LN. La SZH que más se correlacionan con este índice es Patía Alto y Patía Medio, la SZH del río Guáitara tienen la menor correlación con este índice.

Por otra parte, se destaca la existencia de correlaciones positivas entre caudales y el índice TNI que corresponde a un gradiente de temperatura entre la región Niño1+2 y Niño 4, en este sentido, valores negativos de TNI indican un mayor calentamiento de la región Niño 1+2 (más cerca del continente) respecto a la región del Niño 4 (más alejado del continente). Por lo tanto, la relación directa entre el TNI y caudales indica que mientras la TSM en la región del Niño 1+2 es mayor que la TSM en la región del Niño 4 se evidenciarán valores negativos de caudal en la cuenca del Río Patía principalmente en la SZH Guáitara, Patía Alto, Medio y Bajo. Las correlaciones positivas entre caudal y TNI también fueron documentadas por Triana (2021) en el estudio de sequías en el departamento de Nariño en el cual indicó que una correlación positiva con el principal modo de variabilidad del índice estandarizado de precipitación (SPI) influenciará a valores negativos del SPI en la región Oeste del departamento de Nariño.

Del estudio de (Posada-Marín et al., 2023) se detalla que existe diferencia en el comportamiento de las precipitaciones entre el hemisferio sur y norte cuando se presenta el fenómeno ENOS, la cuenca del río Patía se encuentra cerca al Ecuador se considera que esta proximidad ocasiona una respuesta distinta, sobre todo en las SZH del Río Guáitara y Alto Patía (Región Andina) donde se observa una mayor correlación con los índices SOI, ONI y MEI en la zona Norte, esto también fue detallado por (Coelho et al., 2002; Ropelewski & Halpert, 1987), con respecto a la Región Pacífica se observa una menor correlación sobre todo en SZH del río Telembí ya que estos caudales no tienen ninguna componente de los caudales de la región Andina a diferencia de las SZH del Patía Medio y Patía Bajo que reciben los caudales de la Región Andina.

Tabla 38. Matriz de correlaciones de Pearson caudales e índices macroclimáticos ENOS

PEARSON	CAR	YUN	PIL	SPE	AGR	CEN	UNI	PRV	PTJ	CAN	PTF	GCH	PTC2	PTT	HYO	SAJ	FON	PTC1	PNP	PTG	PTP	NOR	PMED	VER	SND	SALI	TLB	PBAJ	SOI	NINO12	NINO3	NINO4	NINO34	MEI	PDO	TNI	ONI	EMI
CAR	1.00	0.67	0.67	0.67	0.72	0.57	0.65	0.70	0.60	0.44	0.59	0.62	0.56	0.60	0.55	0.58	0.61	0.44	0.63	0.68	0.69	0.70	0.72	0.59	0.56	0.45	0.53	0.66	0.35	-0.06	-0.19	-0.33	-0.26	-0.24	-0.04	0.34	-0.26	-0.33
YUN	0.67	1.00	0.53	0.61	0.73	0.54	0.62	0.75	0.57	0.42	0.68	0.75	0.73	0.71	0.70	0.68	0.73	0.62	0.76	0.78	0.80	0.79	0.79	0.66	0.71	0.53	0.58	0.70	0.50	-0.20	-0.30	-0.35	-0.33	-0.31	-0.02	0.26	-0.33	-0.26
PIL	0.67	0.53	1.00	0.83	0.81	0.67	0.64	0.59	0.69	0.71	0.54	0.47	0.41	0.45	0.35	0.44	0.43	0.24	0.43	0.54	0.59	0.60	0.58	0.31	0.27	0.20	0.32	0.49	0.19	-0.10	-0.22	-0.37	-0.29	-0.25	0.02	0.31	-0.28	-0.33
SPE	0.67	0.61	0.83	1.00	0.91	0.69	0.76	0.80	0.76	0.71	0.62	0.56	0.52	0.53	0.49	0.50	0.55	0.37	0.55	0.66	0.74	0.68	0.67	0.40	0.40	0.21	0.37	0.56	0.29	-0.17	-0.31	-0.47	-0.40	-0.40	-0.13	0.35	-0.39	-0.42
AGR	0.72	0.73	0.81	0.91	1.00	0.71	0.81	0.86	0.77	0.70	0.67	0.69	0.64	0.69	0.62	0.66	0.68	0.53	0.70	0.78	0.82	0.77	0.76	0.54	0.52	0.29	0.46	0.65	0.40	-0.18	-0.32	-0.47	-0.41	-0.41	-0.11	0.36	-0.41	-0.42
CEN	0.57	0.54	0.67	0.69	0.71	1.00	0.75	0.63	0.71	0.72	0.58	0.52	0.44	0.48	0.47	0.48	0.47	0.41	0.48	0.56	0.60	0.63	0.59	0.32	0.37	0.26	0.24	0.44	0.16	-0.11	-0.20	-0.26	-0.23	-0.19	0.01	0.19	-0.22	-0.21
UNI	0.65	0.62	0.64	0.76	0.81	0.75	1.00	0.82	0.73	0.67	0.64	0.70	0.62	0.64	0.62	0.60	0.66	0.52	0.68	0.74	0.75	0.72	0.71	0.56	0.53	0.30	0.36	0.56	0.38	-0.11	-0.26	-0.34	-0.33	-0.34	-0.12	0.32	-0.34	-0.36
PRV	0.70	0.75	0.59	0.80	0.86	0.63	0.82	1.00	0.74	0.59	0.72	0.78	0.75	0.74	0.71	0.69	0.76	0.60	0.77	0.83	0.84	0.81	0.81	0.63	0.65	0.40	0.48	0.68	0.47	-0.19	-0.33	-0.43	-0.40	-0.43	-0.18	0.33	-0.41	-0.38
PTJ	0.60	0.57	0.69	0.76	0.77	0.71	0.73	0.74	1.00	0.74	0.69	0.63	0.60	0.61	0.61	0.58	0.65	0.40	0.63	0.75	0.76	0.73	0.69	0.50	0.47	0.25	0.26	0.50	0.32	-0.13	-0.29	-0.40	-0.36	-0.33	-0.18	0.33	-0.36	-0.35
CAN	0.44	0.42	0.71	0.71	0.70	0.72	0.67	0.59	0.74	1.00	0.62	0.55	0.49	0.51	0.47	0.52	0.52	0.40	0.50	0.60	0.62	0.62	0.59	0.34	0.30	0.10	0.11	0.36	0.25	-0.14	-0.23	-0.29	-0.27	-0.23	-0.10	0.19	-0.27	-0.24
PTF	0.59	0.68	0.54	0.62	0.67	0.58	0.64	0.72	0.69	0.62	1.00	0.86	0.85	0.84	0.82	0.75	0.83	0.60	0.78	0.83	0.81	0.88	0.83	0.69	0.68	0.45	0.39	0.63	0.55	-0.21	-0.34	-0.40	-0.39	-0.33	-0.13	0.30	-0.39	-0.31
GCH	0.62	0.75	0.47	0.56	0.69	0.52	0.70	0.78	0.63	0.55	0.86	1.00	0.89	0.88	0.87	0.77	0.90	0.70	0.90	0.90	0.85	0.86	0.83	0.81	0.74	0.44	0.45	0.65	0.63	-0.21	-0.36	-0.36	-0.39	-0.37	-0.14	0.30	-0.41	-0.29
PTC2	0.56	0.73	0.41	0.52	0.64	0.44	0.62	0.75	0.60	0.49	0.85	0.89	1.00	0.92	0.88	0.84	0.92	0.70	0.90	0.90	0.87	0.89	0.87	0.79	0.83	0.57	0.48	0.69	0.69	-0.26	-0.40	-0.44	-0.45	-0.41	-0.24	0.33	-0.45	-0.35
PTT	0.60	0.71	0.45	0.53	0.69	0.48	0.64	0.74	0.61	0.51	0.84	0.88	0.92	1.00	0.88	0.86	0.94	0.71	0.92	0.91	0.87	0.89	0.87	0.80	0.80	0.53	0.48	0.70	0.67	-0.23	-0.37	-0.41	-0.42	-0.39	-0.18	0.32	-0.43	-0.35
HYO	0.55	0.70	0.35	0.49	0.62	0.47	0.62	0.71	0.61	0.47	0.82	0.87	0.88	0.88	1.00	0.79	0.92	0.68	0.88	0.87	0.83	0.83	0.81	0.79	0.78	0.50	0.45	0.65	0.63	-0.23	-0.38	-0.42	-0.43	-0.37	-0.19	0.32	-0.44	-0.34
SAJ	0.58	0.68	0.44	0.50	0.66	0.48	0.60	0.69	0.58	0.52	0.75	0.77	0.84	0.86	0.79	1.00	0.84	0.62	0.81	0.85	0.82	0.85	0.82	0.72	0.76	0.50	0.42	0.64	0.62	-0.24	-0.35	-0.39	-0.39	-0.34	-0.22	0.26	-0.40	-0.31
FON	0.61	0.73	0.43	0.55	0.68	0.47	0.66	0.76	0.65	0.52	0.83	0.90	0.92	0.94	0.92	0.84	1.00	0.72	0.94	0.94	0.87	0.89	0.87	0.83	0.81	0.54	0.49	0.70	0.67	-0.22	-0.37	-0.41	-0.43	-0.39	-0.20	0.33	-0.44	-0.36
PTC1	0.44	0.62	0.24	0.37	0.53	0.41	0.52	0.60	0.40	0.40	0.60	0.70	0.70	0.71	0.68	0.62	0.72	1.00	0.78	0.73	0.68	0.70	0.69	0.65	0.71	0.51	0.43	0.58	0.52	-0.24	-0.29	-0.25	-0.29	-0.29	-0.17	0.12	-0.31	-0.16
PNP	0.63	0.76	0.43	0.55	0.70	0.48	0.68	0.77	0.63	0.50	0.78	0.90	0.90	0.92	0.88	0.81	0.94	0.78	1.00	0.96	0.92	0.90	0.88	0.83	0.83	0.56	0.49	0.70	0.66	-0.22	-0.37	-0.41	-0.42	-0.40	-0.22	0.34	-0.44	-0.35
PTG	0.68	0.78	0.54	0.66	0.78	0.56	0.74	0.83	0.75	0.60	0.83	0.90	0.90	0.91	0.87	0.85	0.94	0.73	0.96	1.00	0.97	0.94	0.92	0.81	0.80	0.53	0.49	0.73	0.64	-0.21	-0.37	-0.44	-0.43	-0.41	-0.23	0.37	-0.45	-0.38
PTP	0.69	0.80	0.59	0.74	0.82	0.60	0.75	0.84	0.76	0.62	0.81	0.85	0.87	0.87	0.83	0.82	0.87	0.68	0.92	0.97	1.00	0.94	0.92	0.74	0.78	0.52	0.52	0.75	0.59	-0.20	-0.37	-0.48	-0.44	-0.42	-0.23	0.39	-0.46	-0.41
NOR	0.70	0.79	0.60	0.68	0.77	0.63	0.72	0.81	0.73	0.62	0.88	0.86	0.89	0.89	0.83	0.85	0.89	0.70	0.90	0.94	0.94	1.00	0.97	0.75	0.80	0.64	0.51	0.77	0.58	-0.21	-0.35	-0.44	-0.40	-0.37	-0.19	0.34	-0.41	-0.35
PMED	0.72	0.79	0.58	0.67	0.76	0.59	0.71	0.81	0.69	0.56	0.83	0.83	0.87	0.87	0.81	0.82	0.87	0.69	0.88	0.92	0.92	0.97	1.00	0.76	0.82	0.67	0.67	0.89	0.58	-0.20	-0.34	-0.43	-0.39	-0.37	-0.15	0.33	-0.40	-0.35
VER	0.59	0.66	0.31	0.40	0.54	0.32	0.56	0.63	0.50	0.34	0.69	0.81	0.79	0.80	0.79	0.72	0.83	0.65	0.83	0.81	0.74	0.75	0.76	1.00	0.79	0.52	0.51	0.66	0.64	-0.21	-0.36	-0.35	-0.39	-0.37	-0.18	0.27	-0.40	-0.28
SND	0.56	0.71	0.27	0.40	0.52	0.37	0.53	0.65	0.47	0.30	0.68	0.74	0.83	0.80	0.78	0.76	0.81	0.71	0.83	0.80	0.78	0.80	0.82	0.79	1.00	0.78	0.57	0.72	0.63	-0.19	-0.29	-0.28	-0.30	-0.28	-0.18	0.21	-0.31	-0.21
SALI	0.45	0.53	0.20	0.21	0.29	0.26	0.30	0.40	0.25	0.10	0.45	0.44	0.57	0.53	0.50	0.50	0.54	0.51	0.56	0.53	0.52	0.64	0.67	0.52	0.78	1.00	0.52	0.62	0.37	-0.13	-0.16	-0.17	-0.17	-0.15	-0.06	0.14	-0.17	-0.12
TLB	0.53	0.58	0.32	0.37	0.46	0.24	0.36	0.48	0.26	0.11	0.39	0.45	0.48	0.48	0.45	0.42	0.49	0.43	0.49	0.49	0.52	0.51	0.67	0.51	0.57	0.52	1.00	0.90	0.33	-0.08	-0.13	-0.22	-0.17	-0.17	0.07	0.21	-0.16	-0.18
PBAJ	0.66	0.70	0.49	0.56	0.65	0.44	0.56	0.68	0.50	0.36	0.63	0.65	0.69	0.70	0.65	0.64	0.70	0.58	0.70	0.73	0.75	0.77	0.89	0.66	0.72	0.62	0.90	1.00	0.46	-0.13	-0.25	-0.34	-0.30	-0.29	-0.04	0.30	-0.29	-0.30
SOI	0.35	0.50	0.19	0.29	0.40	0.16	0.38	0.47	0.32	0.25	0.55	0.63	0.69	0.67	0.63	0.62	0.67	0.52	0.66	0.64	0.59	0.58	0.58	0.64	0.63	0.37	0.33	0.46	1.00	-0.30	-0.39	-0.36	-0.41	-0.40	-0.19	0.23	-0.42	-0.31
NINO12	-0.06	-0.20	-0.10	-0.17	-0.18	-0.11	-0.11	-0.19	-0.13	-0.14	-0.21	-0.21	-0.26	-0.23	-0.23	-0.24	-0.22	-0.24	-0.22	-0.21	-0.20	-0.21	-0.20	-0.21	-0.19	-0.13	-0.08	-0.13	-0.30	1.00	0.83	0.44	0.67	0.67	0.33	0.37	0.67	-0.07
NINO3	-0.19	-0.30	-0.22	-0.31	-0.32	-0.20	-0.26	-0.33	-0.29	-0.23	-0.34	-0.36	-0.40	-0.37	-0.38	-0.35	-0.37	-0.29	-0.37	-0.37	-0.37	-0.35	-0.34	-0.36	-0.29	-0.16	-0.13	-0.25	-0.39	0.83	1.00	0.75	0.94	0.85	0.41	-0.04	0.93	0.31
NINO4	-0.33	-0.35	-0.37	-0.47	-0.47	-0.26	-0.34	-0.43	-0.40	-0.29	-0.40	-0.36	-0.44	-0.41	-0.42	-0.39	-0.41	-0.25	-0.41	-0.44	-0.48	-0.44	-0.43	-0.35	-0.28	-0.17	-0.22	-0.34	-0.36	0.44	0.75	1.00	0.89	0.79	0.43	-0.60	0.89	0.79
NINO34	-0.26	-0.33	-0.29	-0.40	-0.41	-0.23	-0.33	-0.40	-0.36	-0.27	-0.39	-0.39	-0.45	-0.42	-0.43	-0.39	-0.43	-0.29	-0.42	-0.43	-0.44	-0.40	-0.39	-0.39	-0.30	-0.17	-0.17	-0.30	-0.41	0.67	0.94	0.89	1.00	0.89	0.45	-0.31	0.99	0.57
MEI	-0.24	-0.31	-0.25	-0.40	-0.41	-0.19	-0.34	-0.43	-0.33	-0.23	-0.33	-0.37	-0.41	-0.39	-0.37	-0.34	-0.39	-0.29	-0.40	-0.41	-0.42	-0.37	-0.37	-0.37	-0.28	-0.15	-0.17	-0.29	-0.40	0.67	0.85	0.79	0.89	1.00	0.53	-0.23	0.91	0.53

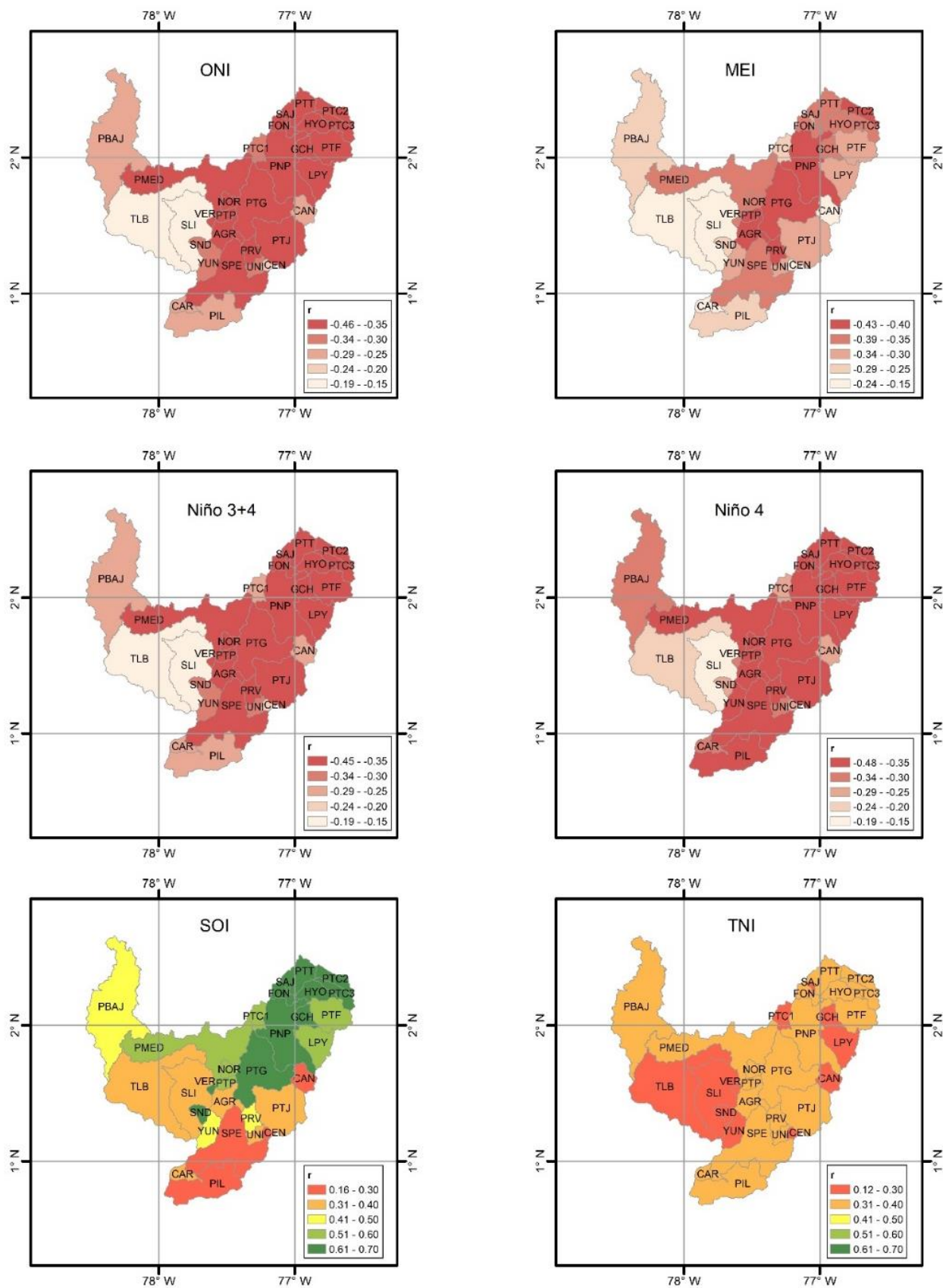


Figura 28. Correlaciones de Pearson con índices macroclimáticos – ENOS

6.2.2 Análisis de Composiciones

De las diferentes series temporales de caudales es relevante identificar los eventos más extremos que ocurren en la cuenca tales como altos caudales y bajos caudales de las series temporales analizadas, y determinar si el incremento o disminución de caudal están relacionados con eventos ENOS. Para ello, se utilizó las series de caudales de las estaciones que se encuentran más aguas abajo de cada SZH de interés. Para el caso de las CRA-Patía, se analizaron las series temporales de caudal estacionales de las SZHs Guátara y Alto Patía, mientras que para las CRP se analizaron los caudales estacionales de las SZHs Patía Medio, Telembí y Patía Bajo. Considerando que la región y la hidroclimatología en la cuenca del Río Patía se ve influenciada por el doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se estimaron los caudales para los trimestres Enero-Febrero-Marzo (EFM), Abril-Mayo-Junio (AMJ), Julio-Agosto-Septiembre (JAS) y Octubre-Noviembre-Diciembre (OND).

La selección de eventos negativos (positivos) de caudal se realizó mediante la selección de eventos de caudal que se encuentran por debajo del cuantil 25 (Por encima del cuantil 75). Este análisis se considera como un indicador relevante para analizar estados climáticos específicos, que proporcionan información sobre las vías de conexión océano – atmosféricas (Boschat et al., 2016), en este caso relacionadas con el fenómeno ENOS.

Mediante el análisis de composiciones, en la SZH Guátara se identificaron 8 eventos negativos y 9 eventos positivos para los caudales de EFM, AMJ, JAS y OND (Ver Tabla 39). Los eventos identificados fueron analizados en contraste con el índice ONI para encontrar la relación de los caudales con respecto al fenómeno ENOS. Los resultados indican que para el trimestre EFM el 87.50% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años en que se registró el fenómeno EN, de los cuales el 50%, 25% y 12.5% corresponden a EN débil, moderado y fuerte, respectivamente; por su parte, el 66.66% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años en los que se registró el fenómeno LN, de los cuales el 33.33% y 33.33% corresponden a LN débil y moderada, respectivamente (Ver Figura 29a).

Este mismo análisis indicó que los caudales en el trimestre AMJ el 37.50% (33.33%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN(LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles (Ver Figura 29b). Por su parte, la oferta hídrica en el trimestre JAS el 37.50% (55.56%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN(LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles y moderados (Ver Figura 29c).

Finalmente, el análisis para el trimestre OND indicó que el 25% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años EN, de los cuales el 12.5% y 12.5% corresponden a EN débil y fuerte, respectivamente. En contraste, el 88.89% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años LN, de los cuales el 44.44%, 22.22% y 22.22% corresponden a LN débil, moderada y fuerte respectivamente (Ver Figura 29d).

Tabla 39. Selección de eventos - Análisis de Composiciones caudales estacionales – SZH Guátitara

EFM				AMJ				JAS				OND			
Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)	
Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹	Año	Caudal m ³ .s ⁻¹
1987	55.97	1984	120.83	1985	79.59	1984	133.86	1987	59.29	1985	70.35	1985	54.35	1984	95.43
1988	47.30	1994	111.94	1991	73.00	1994	115.20	1992	59.53	1988	70.37	1990	49.41	1988	116.67
1992	36.32	1996	132.60	1992	57.74	1996	134.20	1995	48.93	1989	71.63	1992	35.99	1993	100.77
1995	46.93	1999	143.43	1995	73.23	2000	198.99	2003	54.43	1996	72.26	1996	55.47	1999	141.07
1998	35.57	2000	118.76	1997	80.10	2006	125.33	2004	53.57	2000	77.49	1997	50.87	2005	91.38
2002	49.44	2008	146.17	2001	76.87	2007	118.33	2012	54.70	2007	72.83	2001	39.29	2007	119.10
2010	45.34	2009	125.60	2002	77.34	2008	152.47	2015	51.56	2008	77.84	2009	55.48	2008	96.23
2016	47.83	2012	149.99	2003	52.39	2011	134.85	2016	58.90	2009	74.25	2012	40.99	2010	128.24
-	-	2017	115.09	-	-	2017	137.48	-	-	2011	93.52	-	-	2011	148.23
Prom	45.59	Prom	129.38	Prom	71.28	Prom	138.97	Prom	55.11	Prom	75.62	Prom	47.73	Prom	115.23

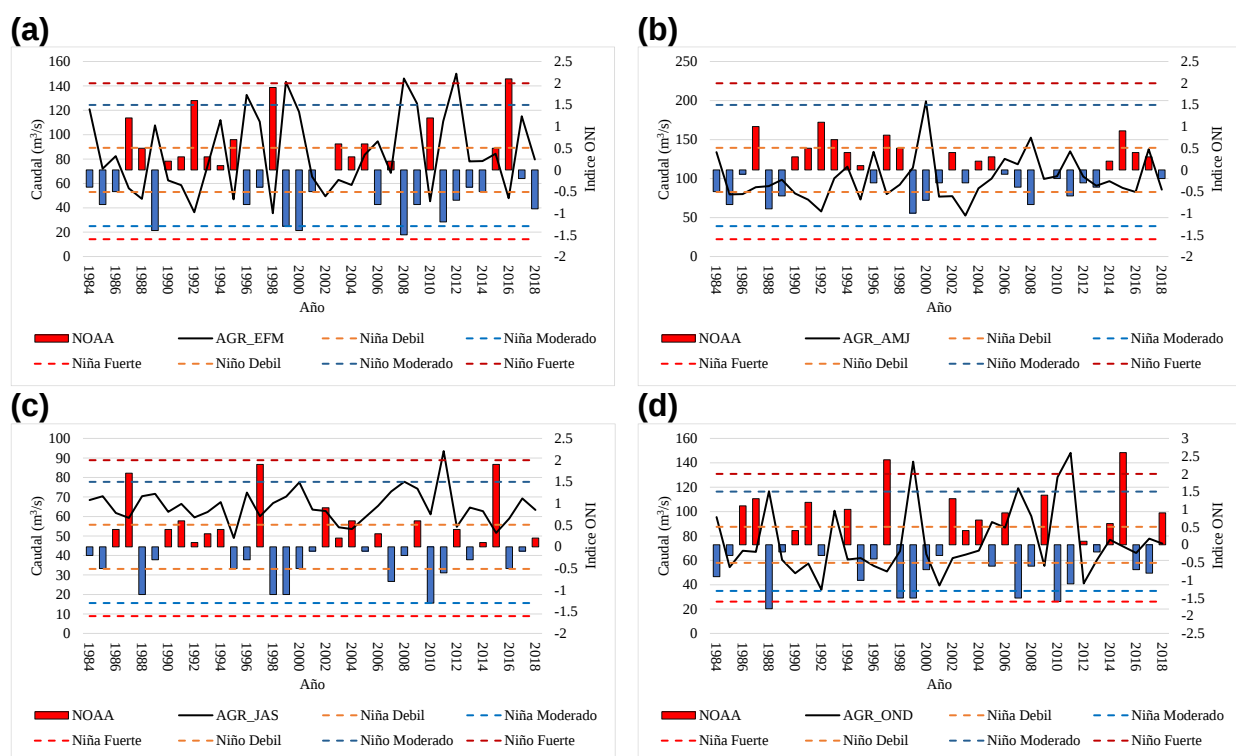


Figura 29. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Guátitara – AGR. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.

Durante el trimestre AMJ el 62.50% (44.44%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN(LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles (Ver Figura 30b). En el trimestre JAS el 12.50% (55.56%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN (LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles y moderados (Ver Figura 30c). Por su parte, durante el trimestre OND indicó que el 37.50% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años EN de categoría débil y fuerte, en contraste, el 88.89% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años LN, de los cuales el 44.44%, 22.22% y 22.22% corresponden a LN débil, moderada y fuerte respectivamente (Ver Figura 30d).

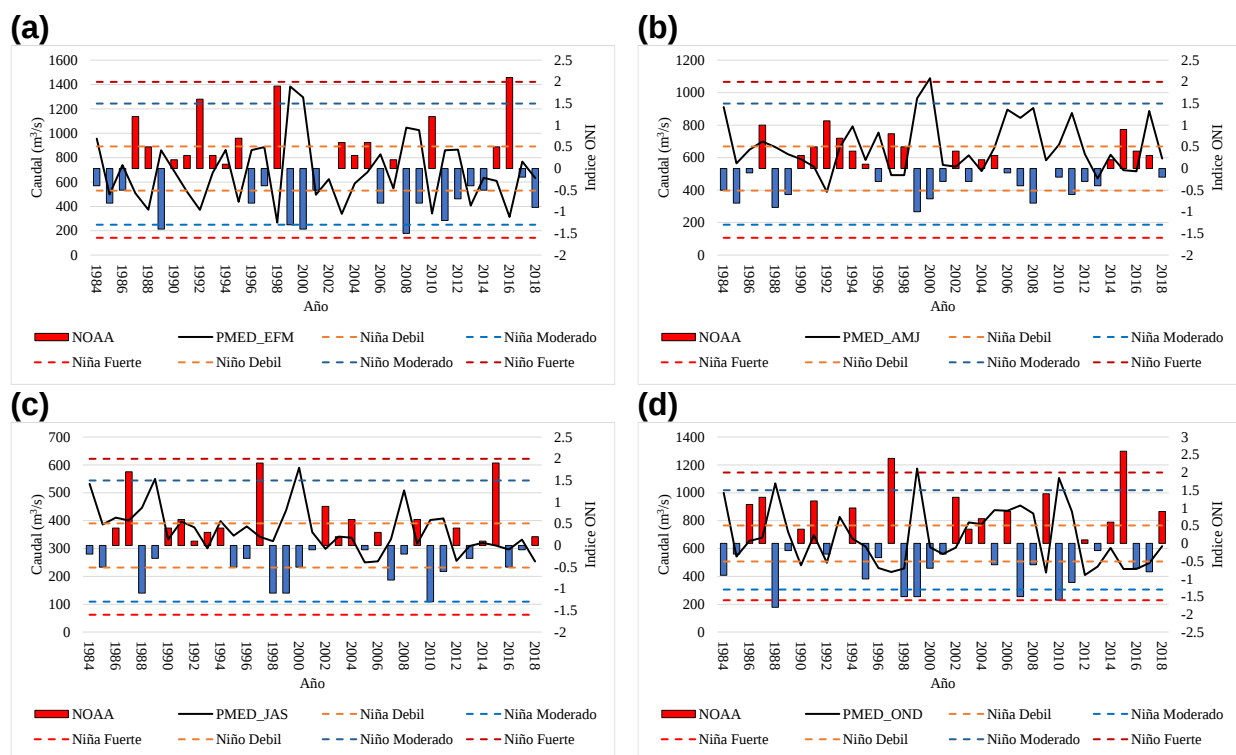


Figura 30. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Patía Medio. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.

Del análisis de composiciones realizado para la SZH Telembí se identificaron 8 (9) eventos negativos (positivos) para los caudales de EFM, AMJ, JAS y OND (Ver Tabla 40).

Tabla 40. Selección de eventos - Análisis de Composiciones caudales estacionales – SZH Telembí

EFM				AMJ				JAS				OND			
Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)	
Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$
1985	604.13	1984	1040.48	1992	585.19	1984	1079.89	1993	343.58	1984	828.69	1990	533.94	1984	961.70
1992	483.37	1986	804.16	1995	637.92	1986	889.40	1994	285.98	1985	573.33	1994	490.98	1986	819.68
1995	428.06	1989	821.54	1997	632.10	1988	1034.79	1997	347.84	1987	628.34	1995	525.90	1987	849.98
1997	581.34	1993	869.53	1998	650.16	1999	999.12	2002	352.70	1988	614.23	1996	481.82	1988	860.18
2001	530.44	1999	808.08	2001	645.82	2000	988.10	2005	298.62	1989	602.01	1998	494.73	1989	849.80
2002	487.35	2008	889.95	2002	500.61	2003	919.08	2006	286.75	1998	629.55	2000	605.14	2003	1038.80
2003	468.70	2011	867.34	2009	547.13	2007	977.86	2012	281.40	2008	729.31	2001	421.89	2006	902.33
2013	609.02	2012	832.35	2015	640.34	2008	987.00	2018	335.48	2010	631.94	2017	537.64	2010	1001.29
-	-	2014	821.33	-	-	2017	890.66	-	-	2011	567.69	-	-	2014	922.32
Prom	524.05	Prom	861.64	Prom	604.91	Prom	973.99	Prom	316.54	Prom	645.01	Prom	511.50	Prom	911.79

Los eventos identificados fueron analizados en contraste con el índice ONI, en donde los resultados indicaron que para el trimestre EFM el 37.50% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años en que se registró el fenómeno EN, de los cuales el 25% y 12.5% corresponden a EN débil y moderado, respectivamente; por su parte, el 55.56% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años en los que se registró el fenómeno LN, de los cuales el 22.22% y 33.33% corresponden a LN débil y moderada, respectivamente (Ver Figura 31a).

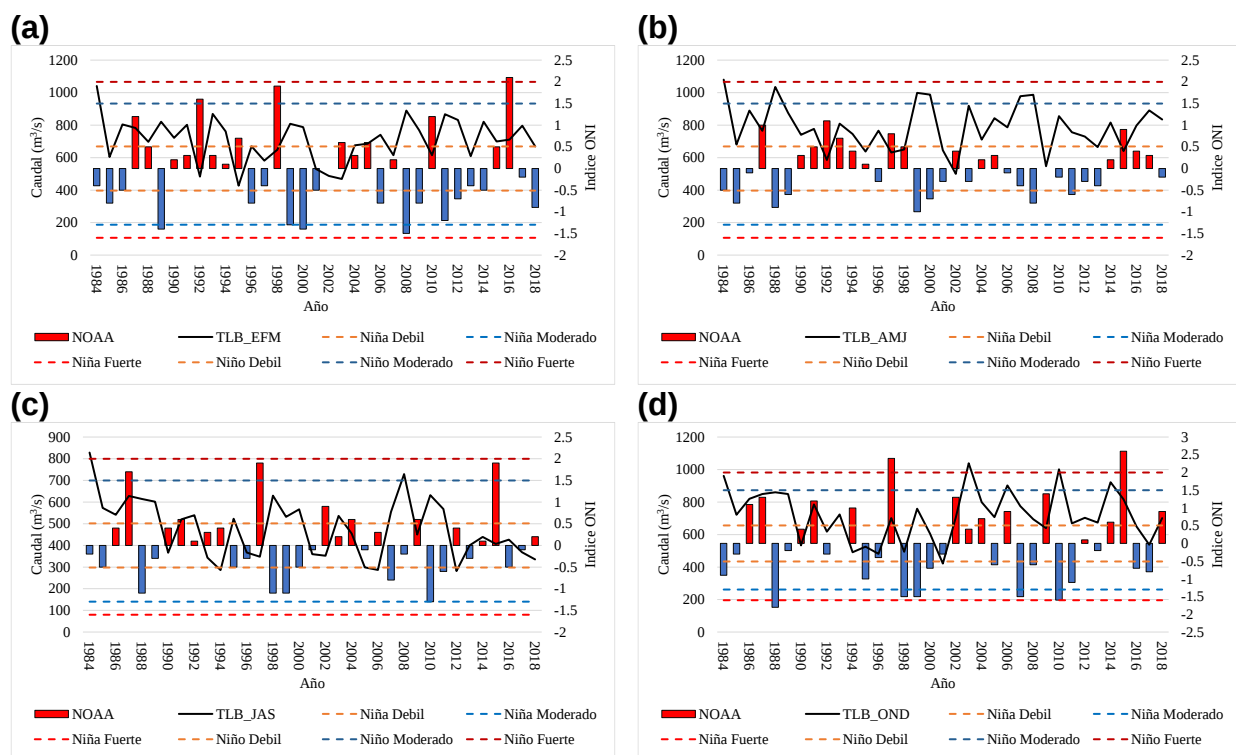


Figura 31. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Telembí. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.

Durante el trimestre AMJ el 50% (44.44%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN(LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles (Ver Figura 31b). En el trimestre JAS el 25% (55.56%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN (LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles y moderados (Ver Figura 31c). Por su parte, durante el trimestre OND indicó que el 12.50% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años EN de categoría débil, en contraste, el 33.33% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años LN, de los cuales el 11.11% y 22.22% corresponden a LN débil y fuerte respectivamente (Ver Figura 31d). La SZH de río Telembí presenta la menor correlación con los índices ENOS por esta razón sus porcentajes de concordancia con los eventos EN y LN son bajos.

Finalmente, del análisis de composiciones realizado para la SZH Patía Bajo se identificaron los eventos en los cuales los caudales estacionales se encuentran por debajo (encima) del percentil 25 (75) (Ver Tabla 41), encontrando 8 (9) eventos para los caudales de EFM, AMJ, JAS y OND. En contraste con el índice ONI, en donde los resultados indican que para el trimestre EFM el 87.50% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años en que se registró el fenómeno EN, de los cuales el 50%, 25% y 12.5% corresponden a EN débil, moderado y fuerte, respectivamente; por su parte, el 88.89% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años en los que se registró el fenómeno LN, de los cuales el 44.44% y 44.44% corresponden a LN débil y moderada, respectivamente (Ver Figura 32a).

Tabla 41. Selección de eventos - Análisis de Composiciones caudales estacionales – SZH Patía Bajo

EFM				AMJ				JAS				OND			
Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)		Eventos (-)		Eventos (+)	
Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$	Año	Caudal $m^3.s^{-1}$
1988	1222.31	1984	2388.65	1992	1303.25	1984	2420.60	1993	854.12	1984	1677.96	1990	1167.78	1984	2351.12
1992	1115.88	1989	1883.42	1997	1406.43	1988	1965.74	1994	826.50	1987	1275.95	1992	1307.27	1988	2097.08
1995	1120.05	1999	2586.44	1998	1509.71	1999	2596.19	2002	835.42	1988	1242.42	1996	1110.03	1989	1918.13
1998	1234.30	2000	2503.19	2002	1356.04	2000	2540.85	2005	659.87	1989	1486.71	1998	1186.66	1999	2232.40
2003	1101.98	2006	1897.26	2004	1464.95	2003	2099.65	2006	745.08	1998	1454.59	2001	1197.37	2003	2200.63
2010	1232.32	2008	2369.43	2009	1355.49	2006	1959.97	2012	694.66	1999	1296.55	2009	1296.07	2005	1842.49
2013	1225.48	2009	2133.79	2013	1495.92	2007	2421.61	2013	888.17	2000	1520.94	2012	1307.91	2006	2202.24
2016	1289.33	2011	2030.35	2015	1459.35	2008	2301.79	2018	804.88	2008	1696.22	2017	1221.53	2007	1950.40
-	-	2012	2037.78	-	-	2017	2200.54	-	-	2010	1342.94	-	-	2010	2431.61
Prom	1192.71	Prom	2203.37	Prom	1418.89	Prom	2278.55	Prom	788.59	Prom	1443.81	Prom	1224.33	Prom	2136.23

Durante el trimestre AMJ el 50% (44.44%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN(LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles (Ver Figura 32b). En el trimestre JAS el 12.50% (55.56%) de los eventos por debajo (encima) del percentil 25 (75) coinciden con años en los que se registró el fenómeno EN (LN) en los cuales los eventos fueron catalogados como débiles y moderados (Ver Figura 32c). Por su parte, durante el trimestre OND indicó que el 12.50% de los eventos por debajo del percentil 25 coinciden con años EN de categoría débil, en contraste, el 66.67% de los eventos por encima del percentil 75 coinciden con años LN, de los cuales el 22.22%, 22.22% y 22.22% corresponden a LN débil, moderada y fuerte respectivamente (Ver Figura 32d).

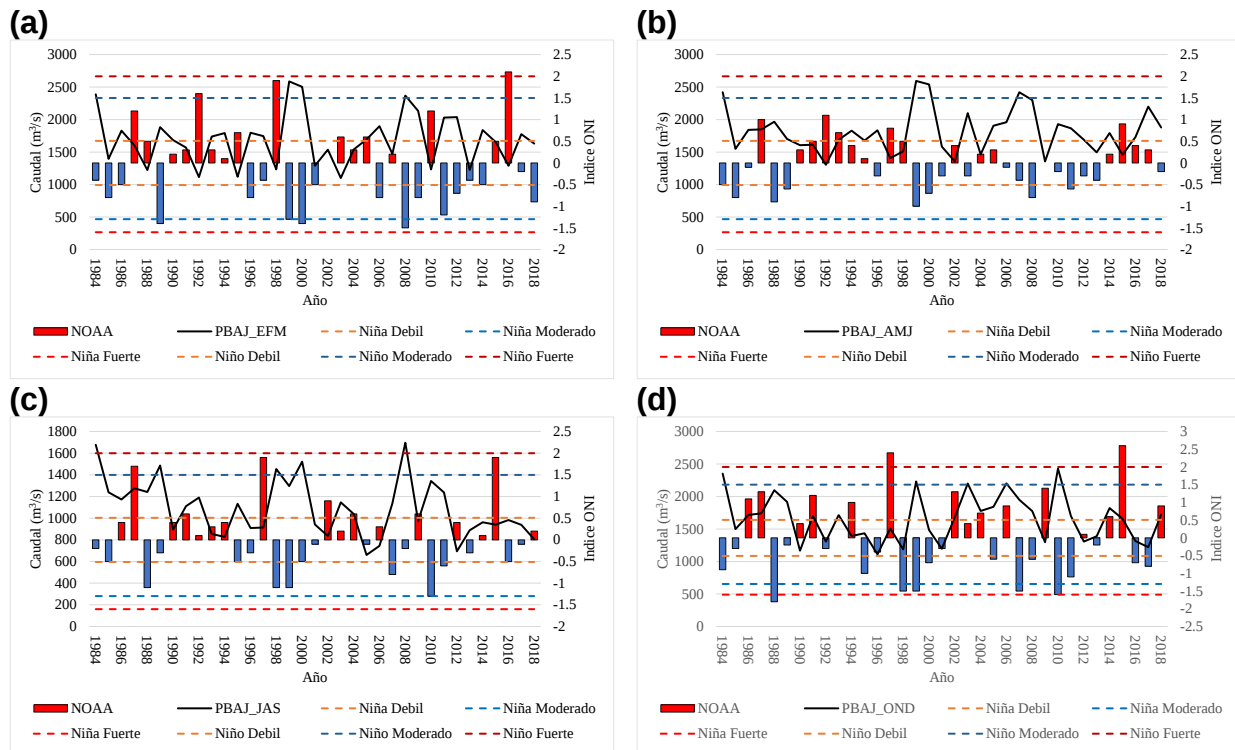


Figura 32. Comportamiento de los caudales estacionales con respecto al fenómeno ENOS – SZH Patía Bajo. a) EFM, b) AMJ, c) JAS y d) OND.

Del análisis de las tres SZH pertenecientes a la CRP – Patía se evidencia que los eventos positivos (eventos negativos) de caudal se registraron principalmente en los años 1992 y 1998 (1989, 1999-2000, 2006, 2008-2009 y 2011-2012) correspondientes a eventos EN (LN). La reducción de caudales coincide con los efectos registrados en Colombia, resaltando que los eventos EN de 1992 y 1998 han sido dos de los eventos más críticos a nivel mundial destacando que EN de 1992 ocasionó la crisis energética en el país por la disminución de los niveles de los ríos y embalses, por su parte, el evento EN 1997-1998 fue denominado el Super Niño, evento que ocasionó efectos adversos sobre Colombia, tales como la reducción en la exportación del cultivo del café e importantes incendios forestales en el país (UNGRD, 2016). En contraste, el evento LN 2011-2012 en Colombia se registraron lluvias extremas e inundaciones y en general en la mayor parte del territorio colombiano los caudales se vieron incrementados afectando aproximadamente al 9% de la población total con pérdidas económicas por \$7.8 billones (CEPAL, 2013).

Posteriormente, se estimó el promedio de caudales estacionales de los eventos que registraron caudales inferiores al percentil del 25% y los caudales superiores al percentil del 75% con el fin de determinar como la oferta hídrica puede incrementar o disminuir cuando hay presencia del fenómeno LN o EN, así como también identificar el trimestre con mayor y menor oferta hídrica, información relevante para el ordenamiento y gestión del recurso hídrico en la SZH – Guátara. Los resultados se muestran en la Figura 33a, en donde se observa que la SZH – Guátara registra mayor (menor) oferta hídrica en el trimestre AMJ (JAS). En el trimestre AMJ cuando hay ocurrencia del fenómeno LN (EN) la oferta hídrica se ve incrementada (disminuida) en un 38.87% (28.76%), por su parte en el trimestre JAS la oferta hídrica se ve incrementada (disminuida) en un 16.10% (15.38%) durante la ocurrencia de eventos LN (EN).

Del análisis de composiciones (Ver Figura 33b) se observa que la SZH Alto Patía registra los caudales más bajos en el trimestre JAS los cuales durante eventos EN (LN) se ven disminuidos (incrementados) en un 28.46% (36.06%), mientras que en el trimestre EFM, durante la ocurrencia de eventos EN(LN) los caudales se disminuyen (incrementan) en 61.24% (67.51%).

Del análisis de composiciones (Ver Figura 33c) se observa que la SZH Patía Medio registra los caudales más bajos en el trimestre JAS los cuales durante eventos EN (LN) se ven disminuidos (incrementados) en un 28.45% (29.77%), mientras que en el trimestre EFM, durante la ocurrencia de eventos EN(LN) los caudales se disminuyen (incrementan) en 47.64% (50.13%).

Para la CRP – Patía en las SZHs de del río Telembí y Patía Bajo (ver Figura 33d y Figura 33d) registran caudales más bajos en el trimestre JAS. Con respecto a los porcentajes de disminución (incremento) de caudales durante eventos EN (LN) se aprecia que este varía poco en todos los trimestres estando dentro de 20% al 30% (22% al 35%), esto puede ser influenciado por la cobertura vegetal densa que existe en esta zona la cual ayuda a regular los caudales en eventos extremos, considerando que esta región hace parte del Choco Biogeográfico Colombiano catalogada como una zona de almacenamiento de biodiversidad (hotspot) que alberga aproximadamente el 3% de las

especies de plantas mundiales (Ceron et al., 2021), adicionalmente se caracteriza por registrar altas precipitaciones hasta 8,000 mm/año (Poveda & Mesa, 2000).

Se escogieron los trimestres EFM, AMJ, JAS y OND ya que estudios desarrollados en el departamento de Nariño en el comportamiento de las precipitaciones y caudales demostraron que estos trimestres describen mejor el ciclo anual ya que existe un rezago de un mes entre la variable precipitación y caudal.

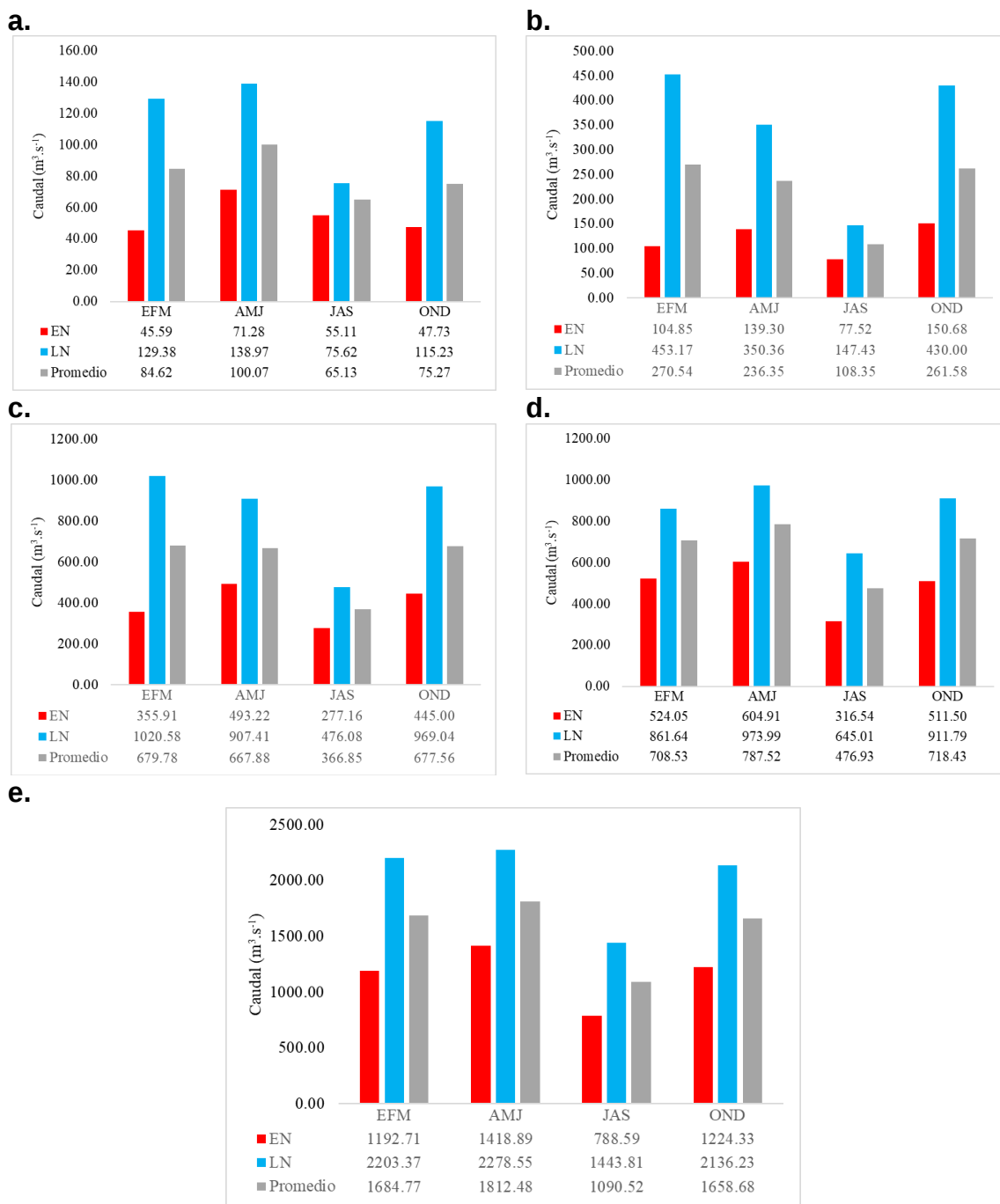


Figura 33. Análisis de composiciones caudales estacionales. a) Guátara b) Patía Alto c) Patía Medio d) Telembí y e) Patía Bajo

En la Tabla 42 se comparan los resultados obtenidos en cuanto a la oferta hídrica expresada en rendimiento de caudal para los periodos normal, LN y EN por trimestres (EFM, AMJ, JAS y OND), se observa que para el año medio en el ENA 2018 y los resultados obtenidos en esta investigación para un periodo normal son valores aproximados a excepción de la SZH Patía Medio donde se tienen resultados mayores en esta investigación. Para el año húmedo ENA 2018 en las SZHs de Patía Alto, Guáitara (CRA-Patía) y Río Telembí y Patía Bajo (CRP-Patía) se reportan mayores rendimientos que los obtenidos en el análisis estacional de los periodos LN, la SZH de Patía Medio el rendimiento es aproximadamente el promedio de los 4 trimestres. Finalmente para el año seco los valores son menores en el ENA 2018 a los obtenidos con el análisis estacional en los periodos EN.

Tabla 42. Rendimiento de Caudal por SZHs comparación ENA 2018 y Periodo normal (a), LN (b) y EN (c)
(a) Periodo normal

SZH	Rendimiento ENA 2018 (L/s*km ²)	Rendimiento periodo normal (L/s*km ²)			
	Medio	EFM	AMJ	JAS	OND
Patía Alto	26.8	30.9	27.0	12.4	29.9
Guáitara	21.7	21.2	25.1	16.3	18.9
Patía Medio	55.9	112.3	114.7	66.9	117.9
Río Telembí	140.3	154.7	171.9	104.1	156.8
Patía Bajo	98.2	104.9	126.4	87.3	93.0

(b) Periodo LN

SZH	Rendimiento ENA 2018 (L/s*km ²)	Rendimiento periodo LN (L/s*km ²)			
	húmedo	EFM	AMJ	JAS	OND
Patía Alto	59.0	51.8	40.0	16.9	49.1
Guáitara	46.8	32.4	34.8	18.9	28.9
Patía Medio	112.8	151.5	144.6	87.5	146.6
Río Telembí	268.6	188.1	212.6	140.8	199.0
Patía Bajo	201.8	113.7	140.6	114.2	90.4

(c) Periodo EN

SZH	Rendimiento ENA 2018 (L/s*km ²)	Rendimiento periodo EN (L/s*km ²)			
	Seco	EFM	AMJ	JAS	OND
Patía Alto	9.4	12.0	15.9	8.9	17.2
Guáitara	8.4	11.4	17.9	13.8	12.0
Patía Medio	27.1	71.1	97.8	50.0	85.3
Río Telembí	57.2	114.4	132.0	69.1	111.6
Patía Bajo	39.9	110.7	113.5	69.0	94.8

En la Figura 34 se presentan de forma espacial los resultados de los análisis estacionales para los periodos LN, Normal y EN presentados en la Tabla 42, donde se observa que el periodo con menor oferta es el trimestre JAS, en periodos EN La cuenca Guáitara presenta la menor oferta en el trimestre EFM, la mayor oferta es para el trimestre AMJ, solo en la SZH Patía Medio se presenta la mayor oferta en el trimestre EFM en periodos LN. De forma general se observa que las CRA – Patía son afectadas más severamente por el fenómeno ENOS que las CRP – Patía.

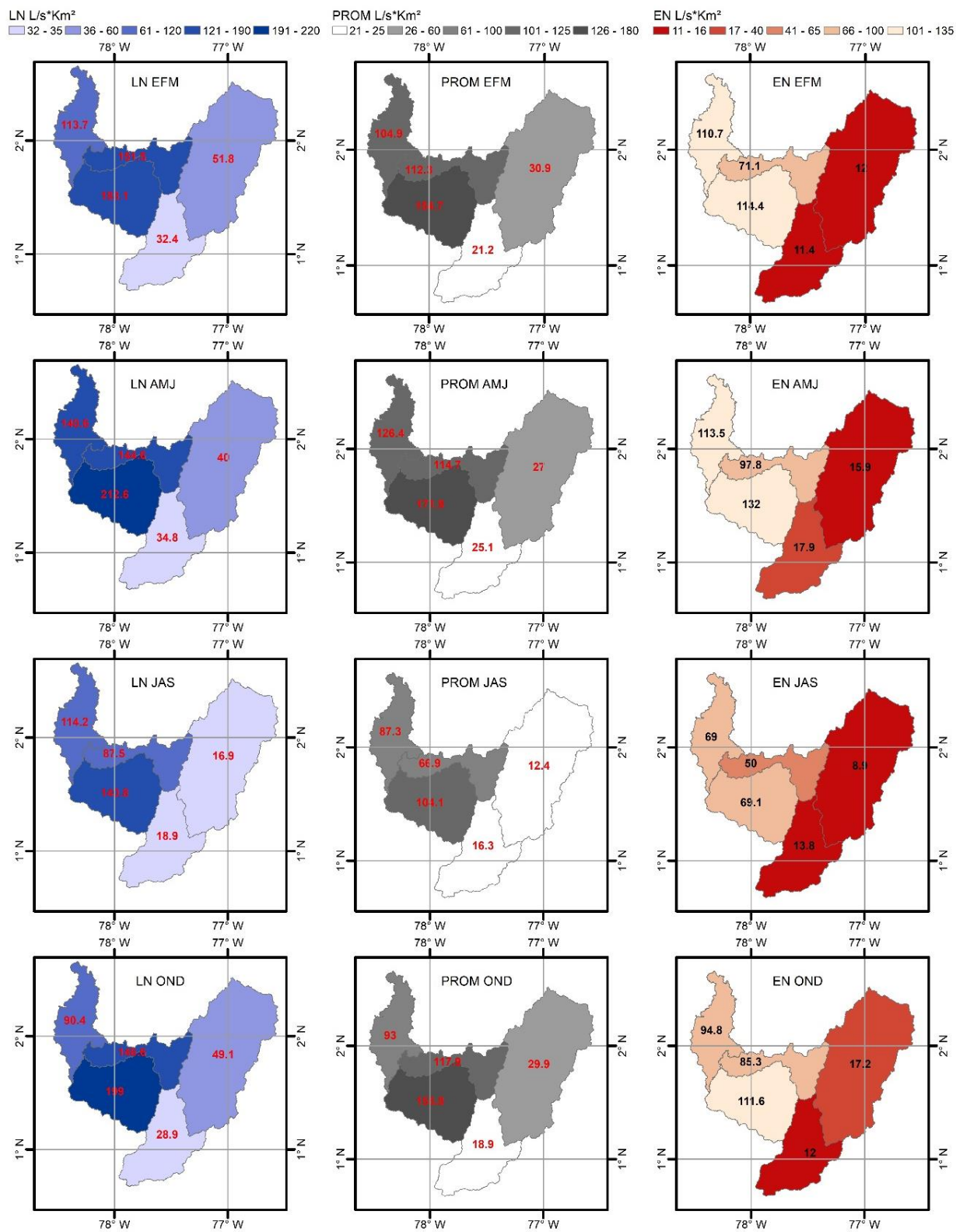


Figura 34. Oferta hídrica en función de rendimiento de caudales por SZH en periodos LN, Normal y EN.

7 CONCLUSIONES

- La caracterización morfométrica mostró que las CRA en su mayoría son cuencas de forma oval oblonga con una de las vertientes del cauce principal mayor. Respecto al relieve de las cuencas se estableció que son moderadamente montañosas muy fuertemente accidentadas, por su parte, la red de drenaje es medianamente drenadas, la constante de estabilidad del río indica que son cuencas con rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo, y la sinuosidad del cauce muestra que mayoritariamente los ríos son rectos. En contraste las CRP tienden a ser rectangulares alargadas, con los cauces principales más recargados hacia una de sus vertientes, son moderadamente montañosas muy fuertemente accidentadas, son medianamente drenadas. Considerando la constante de estabilidad del río indica que son cuencas con suelos altamente permeables, lo que significa una alta capacidad de infiltración o regiones con densa cobertura vegetal, finalmente la sinuosidad del cauce muestra que mayoritariamente los ríos son rectos, excepto los ríos Patía Bajo y Telembí que son ríos sinuosos.
- Los análisis de homogeneidad indicaron que 8 de las 27 estaciones de caudal presentan tendencia negativa en la media, es decir los caudales están disminuyendo, con mayor tendencia en las estaciones Los Nortes y Sali las cuales corresponden a estaciones con los mayores registros de caudal. En la estación Los Nortes, cada 10 años el caudal medio disminuye un 6%, de la misma forma para la estación Sali en la cual los caudales indican una disminución del 11% por década. En cuanto a las estaciones de precipitación se determinó que 3 de las 7 estaciones de las CRP presentan tendencia en la media a incrementar, en la estación Salahonda la precipitación total mensual media aumenta 11% cada 10 años, Los porcentajes de incremento decadal para Maguí y Remolino son 9% y 13% respectivamente.
- Del análisis del ciclo anual de caudales en las estaciones de las CRA y CRP se estableció que estaciones localizadas en Patía Medio (NOR, PTG y SLI) registran un comportamiento mixto entre monomodal y bimodal. De Igual forma las estaciones ROS, VER, UNI y EPT pertenecientes a la SZH del Patía Alto también presentan un régimen mixto. Por su parte, las estaciones AGR, GCA, VTL y CUM pertenecientes a la SZH Guátara tienen un comportamiento bimodal. La precipitación en las CRP del río Patía tiene un comportamiento bimodal en las estaciones VER y SDE, las cuales se encuentran en la parte alta de la cordillera occidental en la vertiente del pacifico. El resto de las estaciones BAR, MAG, SHA, REM, y MOS tienen un comportamiento monomodal.
- Se determinó la oferta hídrica para las CRP por tres (3) métodos: método de Soil Conservation Service, transposición de caudales del río Mira y el modelo de Thomas, realizando análisis comparativos con el ENA 2018 se estableció que los resultados obtenidos con el modelo de Thomas son los de mejor ajuste tanto por caudal como por rendimiento hídrico por SZH y total. Los errores estimados fueron

del 43% para Patía Medio, 5% para el río Telembí y 1.04% para Patía bajo, con un error en la oferta total de 0.97%.

- Para establecer la influencia de índices climáticos de gran escala sobre los caudales de las principales SZHs que conforman las CRA (Guáitara, Patía Alto) y CRP (Patía Medio, Telembí y Patía Bajo) se correlacionaron los caudales mensuales de cada SZH con los 10 índices océano-atmosféricos de gran escala vinculados con el fenómeno ENOS (SOI, MEI, TNI, ONI, PDO, EMI, Niño 4, Niño 3+4, Niño 3, y Niño 1+2). La mayor correlación directa (inversa) resultó con el índice SOI (Niño 3+4) lo cual representa que a un índice positivo mayor caudal (índice positivo menor caudal). En general las CRA tienen mayor correlación con los índices ENOS y las CRP tienen una correlación débil.
- Para determinar y evaluar la influencia del fenómeno ENOS en sus fases extremas sobre la oferta hídrica mensual en las CRA y CRP del Río Patía se realizó el análisis de composiciones por SZH. Las CRA compuestas por las SZHs del río Guáitara y Patía alto registran en ocurrencia de fenómeno La Niña “LN” (El Niño “EN”) la oferta hídrica se ve incrementada (disminuida) en un 38.87% y 67.51% (28.76% y 61.24%) respectivamente. Para las CRP compuesta por la SZHs Patía Medio, río Telembí y Patía Bajo registra en la ocurrencia de eventos EN(LN) los caudales se disminuyen (incrementan) en 47.64%, 33.63% y 27.69% (50.13%, 35.24% y 32.4%) respectivamente, esto puede ser influenciando por la cobertura vegetal densa que existe en esta zona la cual ayuda a regular los caudales en eventos extremos, considerando que esta región hace parte del Choco Biogeográfico Colombiano catalogada como una zona de almacenamiento de biodiversidad (hotspot) que alberga aproximadamente el 3% de las especies de plantas mundiales (Ceron et al., 2021), adicionalmente se caracteriza por registrar altas precipitaciones hasta 8,000 mm/año (Poveda & Mesa, 2000).
- Los resultados obtenidos en cuanto a la oferta hídrica expresada en rendimiento de caudal para los periodos normal, LN y EN por trimestres se establecieron los siguientes resultados por SZHs (máximo, mínimo L/s*km²), para el periodo normal Patía alto (30.9, 12.4), Guáitara (25.1, 16.3), Patía medio (117.9, 66.9), Telembí (171.9, 104.1) y Patía Bajo (126.4, 87.3); Para LN en Patía alto (51.8, 16.9), Guáitara (34.8, 18.9), Patía medio (151.5, 87.5), Telembí (212.6, 140.8) y Patía Bajo (140.6, 90.4); finalmente para EN en Patía alto (17.2, 8.9), Guáitara (17.9, 11.4), Patía medio (97.8, 50), Telembí (132, 69.1) y Patía Bajo (113.5, 69). Las diferencias en la oferta en periodos LN y EN estableció que las CRA – Patía y son afectadas más severamente por el fenómeno ENOS que las CRP – Patía.
- Lo novedoso de este estudio radica en el análisis espacio-temporal de la oferta hídrica de cada SZH que conforma la cuenca del río Patía en función del fenómeno ENOS. Los análisis mostraron que la zona con mayor (menor) correlación con los índices ENOS es la SZH del río Patía Alto (río Telembí). Se destaca que esta cuenca tiene un connotación especial debido a su localización, ya que nace en la región Andina y desemboca en el océano Pacífico, condición que no registra

ninguna otra cuenca. La cuenca del río Mira nace en los andes del Ecuador, pero toda su vertiente esta sobre la cara occidental de la cordillera de los Andes desembocando en el Pacífico Colombiano sin embargo sería importante realizar el mismo análisis para comparar que similitudes y diferencias presentan estas dos cuencas.

8 RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

- Se evidenció diferencias en la influencia que ejerce el Fenómeno ENOS sobre el comportamiento de los caudales en la cuenca del río Patía, siendo mayor en la región Andina y en menor medida en la región Pacifico. En este sentido, se recomienda profundizar en el estudio de este fenómeno en otras cuencas cercanas a esta región con el fin de establecer si existe un patrón de comportamiento, y de esta forma comprender mejor los impactos de la ocurrencia del fenómeno ENOS, lo cual permitiría reducir la vulnerabilidad de la región a la variabilidad climática y los eventos extremos.
- Realizar el análisis de la influencia del fenómeno ENOS sobre la oferta hídrica del río Mira, para comparar los resultados con la cuenca del río Patía.
- En esta investigación se construyó un modelo para estimar la oferta hídrica de las cuencas de la región Pacifico del río Patía, información que en futuras investigaciones recomiendo validar con información de campo y calibrarlo con información de la propia cuenca, de tal manera que pueda ser usado para la reglamentación de esta importante cuenca del suroccidente colombiano.
- Se evidenció que la información hidrométrica y climatológica de la región del Pacífico Nariñense es escasa, por esta razón se recomienda a las autoridades ambientales y a la academia a realizar esfuerzos para ampliar la capacidad de medición mediante la instalación de más estaciones en la región lo cual permitirá tener un mejor control de nuestros recursos.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso, D. F. G., Corredor, J. J. V., Villamil, D. L. T., Reyes, J. F. M., & Rodríguez, C. A. R. (2022). *Determinación de los parámetros morfométricos en cuencas empleando Sistemas de Información Geográfica* (Vol. 54). Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC.
- Alley, W. (1984). On the Treatment of Evapotranspiration. *Soil Moisture Accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models*, 20(Water Resources Research), 1137-1149.
- Aquastat, F. (2011). FAO's information system on water and agriculture. *FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Asensio, S., Moreno, H., & Blanquer, G. (2006). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Valencia, España: sn*.
- Ashok, K., & Yamagata, T. (2009). Climate change: The El Niño with a difference. In *Nature* (Vol. 461, pp. 481-484).
- Avila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y., & Gutiérrez Serna, S. E. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120-133.
- Bank, W. (2017). Renewable internal freshwater resources per capita (cubic meters). In.
- Bedoya, M., Contreras, C., & Ruiz, F. (2010). Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. *Estudio Nacional del agua*, 282-318.
- Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., & Poveda, G. (2019). Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over Medellin's valley, Central Andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7, 92.
- Beltrán García, L. E. (2018). *Efecto de las variables climáticas y uso del suelo sobre la oferta hídrica en la Cuenca del Río Gachaneca (Boyacá-Colombia) como escenario para la gestión integral del recurso hídrico* [Facultad de Ciencias Ambientales y de la Sostenibilidad].
- Beltrán, L., & Díaz, D. C. (2020). Oscilaciones macroclimáticas que afectan la oferta hídrica en la cuenca del río Gachaneca; Boyacá-Colombia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 171-185.
- Berestovoy, V. (2017). Balance hídrico de la cuenca Mbóí Caé asociado a El Niño: oscilación del Sur mediante el sistema Hydro-BID. *Revista Científica Estudios e Investigaciones*, 6, 12-14.
- Bocanegra, J. E. M., Edgar, J., & Caicedo, J. D. P. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2, 7-21.
- Boschat, G., Simmonds, I., Purich, A., Cowan, T., & Pezza, A. B. (2016). On the use of composite analyses to form physical hypotheses: An example from heat wave–SST associations. *Scientific reports*, 6(1), 29599.
- Camilloni, I., Barros, V., Moreiras, S., Poveda, G., & Tomasella, J. (2020). Inundaciones y sequías. In *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos—informe RIOCCADAPT* (pp. 391-417). McGraw Hill España, Madrid.

- Canchala, T., Alfonso Morales, W., Cerón, W. L., Carvajal Escobar, Y., & Caicedo Bravo, E. (2020a). Teleconnections between monthly rainfall variability and large-scale climate indices in Southwestern Colombia. *Water*, 12(7), 1863.
- Canchala, T., Alfonso Morales, W., Carvajal Escobar, Y., Cerón, W. L., & Caicedo Bravo, E. (2020b). Monthly rainfall anomalies forecasting for southwestern Colombia using artificial neural networks approaches. *Water*, 12(9), 2628.
- Canchala, T., Cerón, W. L., Francés, F., Carvajal-Escobar, Y., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., . . . de Souza, R. A. F. (2020c). Streamflow variability in colombian pacific basins and their teleconnections with climate indices. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020526>
- Canchala-Nastar, T., Carvajal-Escobar, Y., Alfonso-Morales, W., Cerón, W. L., & Caicedo, E. (2019). Estimation of missing data of monthly rainfall in southwestern Colombia using artificial neural networks. *Data in brief*, 26, 104517.
- Carmona, A. M., & Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic change*, 123, 301-313.
- Carrillo Soto, G. A., Berbesí Prieto, L. T., & Sandoval Acevedo, B. E. (2016). Regionalización del modelo hidrológico mensual de Thomas en el departamento norte de Santander. *III semana internacional y xi semana de ciencia, tecnología e innovación*, 132-138.
- Carvajal, Y., Grisales, C., & Mateus, J. (1999). Correlation of macroclimatic variables of Pacific Ocean with the volumes of interandean rivers of the Cauca valley (Colombia). *Revista Peruana de Biología*, 6, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/rpb.v6i3.8426>
- CEPAL, N. (2013). Valoración de daños y pérdidas: ola invernal en Colombia 2010-2011.
- Ceron, W. L., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Souza, R. A. (2021). Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93.
- Cerón, W. L., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Canchala, T., Ocampo-Marulanda, C., Avila-Díaz, A., & Antunes, J. (2022). Trend pattern of heavy and intense rainfall events in Colombia from 1981–2018: A trend-EOF approach. *Atmosphere*, 13(2), 156.
- Chaverra, M. A. H., Barrientos, D. A. R., & Quintero, J. E. T. (2018). Evaluación del recurso hídrico superficial en la subcuenca hidrográfica del río Frío en el departamento de Cundinamarca: Oferta, Demanda y Calidad Del Agua. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 127-136.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1996). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Clavijo Galvis, E. Y., & Romero Chedraui, L. (2017). *Cálculo de la oferta y la demanda hídrica para la microcuenca quebrada san pedro abastecedora del acueducto del casco urbano del municipio en Curumani departamento del cesar* Universidad Francisco de Paula Santander]. Ocaña - Colombia.
- Coelho, C. A. d. S., Uvo, C. B., & Ambrizzi, T. (2002). Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. *Theoretical and applied climatology*, 71, 185-197.
- Correa Pimienta, A. M., & Díaz Castañeda, C. H. (2005). *Implementación del modelo de Thomas para el balance hídrico empleando la herramienta computacional hidrosig-java* Potificia Universidad Javeriana]. Bogotá D.C.

- Coulibaly, P., & Burn, D. H. (2004). Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research*, 40(3).
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2015a). Influence of tropical Pacific SST on seasonal precipitation in Colombia: prediction using El Niño and El Niño Modoki. *Climate Dynamics*, 44, 1293-1310.
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gamiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2015b). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*, 124, 41-61.
- Dekking, F. M., Kraaikamp, C., Lopusha, H. P., & Meester, L. E. (2005). *A Modern Introduction to Probability and Statistics: Understanding why and how* (Vol. 488). Springer.
- Duitama Rincón, F. D., Moreno Soto, L. M., & Zamudio H., E. (2015). Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena, empleando el método de transposición de caudales. *Tekme*, 12, 39-48.
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology*. Earthscan.
- Fogt, R. L., Bromwich, D. H., & Hines, K. M. (2011). Understanding the SAM influence on the South Pacific ENSO teleconnection. *Climate dynamics*, 36, 1555-1576.
- Fragala, F. A., & Neira, N. O. (2011). Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá *Ingeniería y Universidad*, 15(1), 145-169.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Hoell, A. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21.
- Gomez, L. F., Gallego, B., & Naranjo, L. (2017). Atlas socioambiental de las cuencas transfronterizas Mira y Mataje: aportes para su ordenamiento y gestión integral Colombia-Ecuador. *Calí: WWF-Colombia*.
- Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., & Barbosa-Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 157-177.
- Guanoquiza, T., & Alexander, B. (2020). Plan de gestión de recurso hídrico para una microcuenca interandina usando el modelo hidrológico hydro-bid.
- Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada la Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 88-108.
- Guerrero, O. (2002). Geomorfología de cuencas. *Obtenido de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oguerra/4_Geomorfologia.pdf*.
- Guevara-Castro, D. F. (2015). Propuesta para determinar la oferta hídrica neta de una cuenca contemplando escenarios extremos: caso de estudio Microcuenca del Río Upín.
- Gómez, J., & Cadena, M. (2017). Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Subdirección de Meteorología*.
- Gómez, M., Danglot, C., & Vega, L. (2013). Cómo seleccionar una prueba estadística. *Revista mexicana de pediatría*, 80(1), 30-34.

- Hincapie, G., Jaramillo, J. M., Rodríguez, J. V., Aguilera, R., Bermúdez, H., Ortiz, S., . . . Cerón, M. R. (2009). Evaluación geológica y prospectividad de la Cuenca Cauca-Patía, Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 9(2), 37-42.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica. *Universidad Politécnica de Valencia: Valencia, Spain*.
- IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua, 2014. In (pp. 496): Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua, 2018. In (pp. 452): Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Iglesias Fernández, I. (2010). *Interacción océano atmósfera: influencia de la (sea surface temperature) SST y de la circulación tremohalina*. <http://www.psc.edu/science/OKeefe/OKeefe.html>
- INVIAS, I. (2009). Manual de Drenaje para carreteras. In: Bogota.
- Jiménez E., H. (1992). Hidrología Básica Tomo I. In: Univalle.
- Kendall, M. (2022). Rank correlation methods (4th edn.) Charles Griffin (1975). *Scientific Reports*, 12, 8724.
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.
- Loaiza Quintero, J. C. (2016). *Implementación del modelo hidrológico "abcd" realizando una calibración regional para la evaluación del impacto del caudal en la cuenca alta del río Bogotá basado en los resultados del downscaling previamente implementados en los modelos de escenarios de cambio climático con series temporales de precipitación y temperatura a nivel mensual*
- Lobo, L. (2004). Guía metodológica para la delimitación del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. *Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe–CAZALAC–UNESCO PHI–Gobierno de Flandes*.
- Londoño, C. (2001). Cuencas hidrográficas: bases conceptuales–caracterización planificación–administración. *Universidad del Tolima*.
- Lux Cardona, B. (2016). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- Martínez, A., & Serna, J. (2018). *Validación de las estimaciones de precipitación con CHIRPS e IRE/IDEAM. Nota Técnica del IDEAM*.
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (1997). *Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. History and description of "El Niño, Southern Oscillation" phenomenon*.
- Medina, F., & Galván, M. (2007). *Imputación de datos: teoría y práctica*. Cepal.
- Miró, J. J., Caselles, V., & Estrela, M. J. (2017). Multiple imputation of rainfall missing data in the Iberian Mediterranean context. *Atmospheric research*, 197, 313-330.
- Montealegre, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceanicos y atmosféricos de meso y gran escala*.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2020). *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

- Ocampo-Marulanda, C., Fernández-Álvarez, C., Cerón, W. L., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Alfonso-Morales, W. (2022). A spatiotemporal assessment of the high-resolution CHIRPS rainfall dataset in southwestern Colombia using combined principal component analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101739.
- Olmos Giupponi, M. B., & Paz, M. C. (2015). The Implementation of the Human Right to Water in Argentina and Colombia. In (Vol. 15, pp. 323-352). Anuario mexicano de derecho internacional: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Parra, L. N., & Justinico, A. J. (2013). Geomorfología de la región del Patía. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 1(1).
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.
- Posada-Marín, J. A., Arias, P. A., Jaramillo, F., & Salazar, J. F. (2023). Global impacts of El Niño on terrestrial moisture recycling. *Geophysical Research Letters*, 50(10), e2023GL103147.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Gil, M. M., & Quiceno, N. (1998). El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3).
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water resources research*, 37(8), 2169-2178.
- Poveda, G., Jaramillo, L., & Vallejo, L. F. (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50(1), 98-118.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of climate*, 10(10), 2690-2702.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical research letters*, 27(11), 1675-1678.
- Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, J. F., Barco, O. J., & Correa, P. L. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6, 121-130.
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3-27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. In *Climate Dynamics* (Vol. 36, pp. 2233-2249).
- Puertas Orozco, O. L., & Carvajal Escobar, Y. (2008). Incidence of El Niño southern oscillation in the precipitation and the temperature of the air in Colombia, using Climate Explorer. *Ingeniería y Desarrollo*(23), 104-118.

- Quishpe-Vásquez, C., Gámiz-Fortis, S. R., García-Valdecasas-Ojeda, M., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2019). Tropical Pacific sea surface temperature influence on seasonal streamflow variability in Ecuador. *International Journal of Climatology*, 39(10), 3895-3914.
- Ramírez Chaves, H. E., Ayerbe Quiñones, F., & Mejía Egas, O. (2010). Mamíferos de la cuenca alta del río Patía en el departamento del Cauca, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 14(1), 92-113.
- Restrepo, L. F., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.
- Reyes, A., Barroso, F. U., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (Vol. 5). Universidad del Valle.
- Riascos Muñoz, D. M. (2012). *Los alcances y límites de la planeación participativa en el ámbito local: el caso de la Organización CORPOAFRO y su iniciativa de planificación regional en el Valle de Patía (2003-2011)* [Quito: FLACSO Sede Ecuador].
- Rivera, H. G., Domínguez, E., Marín, R., & Vanegas, R. (2004). Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. *Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 4.
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly weather*, 115, 1606-1626.
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *Journal of climate*, 268-284.
- Salas, J. D., Smith, R. A., Tabios, G. Q., & Heo, J.-H. (2002). Statistical computer techniques in water resources and environmental engineering. *Course notes, Department of Civil Engineering, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado*.
- Scholz, M., Kaplan, F., Guy, C. L., Kopka, J., & Selbig, J. (2005). Non-linear PCA: a missing data approach. *Bioinformatics*, 21(20), 3887-3895.
- Segerer, C., & Villodas, R. (2006). Hidrología I. *Universidad Nacional de Cuyo, Argentina*.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- Senante, M. M., Arce, M. M., Sancho, F. H., & Garrido, R. S. (2013). Gestión y planificación de recursos hídricos: un enfoque basado en la optimización. *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 14(2), 159-167.
- Siam, M. S., & Eltahir, E. A. (2015). Explaining and forecasting interannual variability in the flow of the Nile River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3), 1181-1192.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- Sánchez Martínez, M., & Carvacho Bart, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*(50), 171-186.
- Tedeschi, R. G., Cavalcanti, I. F., & Grimm, A. M. (2013). Influences of two types of ENSO on South American precipitation. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1382-1400.
- Tedeschi, R. G., Grimm, A. M., & Cavalcanti, I. F. A. (2015). Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring

- and summer. *International Journal of Climatology*, 35(8), 2045-2064. <https://doi.org/10.1002/joc.4106>
- Thomas, H., Marin, C., Brown, M., & Fiering, M. (1983). Methodology for water resource assessment, report to US Geological Survey. *Rep. NTIS*, 84-124163.
- Thomas Jr, H. A. (1981). Improved methods for national tvater assessment water resources contract: WR15249270. *US Water Resources Council: Washington, DC, USA*.
- Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2000). *Indices of El Niño Evolution*. www.cgd.ucar.edu/cas/indices/.
- Triana Madrid, J. C. (2021). *Evaluación de la sequia en el departamento de Nariño mediante el índice estandarizado de precipitación evapotranspiración (SPEI) utilizando inteligencia artificial* Universidad del Valle]. Santiago de Cali.
- Trinchin, R., Manta, G., Santana, R., Rubio, L., Horta, S., Passadore, C., . . . Barreiro, M. (2021). Hacia un monitoreo continuo de variables oceanográficas en el Parque Nacional Isla de Flores, Uruguay. *Innotec*(21).
- UNGRD. (2016). Fenómeno El Niño: Análisis Comparativo 1997-1998//2014-2016. *Bogotá, DC.: Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres*.
- UNGRD. (2018). Guía para la integración de la variabilidad climática con la gestión del riesgo de desastres a nivel territorial. In Ó. L. Muñoz, D. C. Hernández, R. P. Murillo, & D. A. R. Gutiérrez (Eds.), (pp. 93): Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá, 2018.
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149-4162.
- Velásquez Restrepo, M., & Poveda, G. (2019). Estimation of the water balance of the colombian pacific region. *Dyna*, 86(208), 297-306.
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58-71.
- Welhouse, L. J., Lazzara, M. A., Keller, L. M., Tripoli, G. J., & Hitchman, M. H. (2016). Composite analysis of the effects of ENSO events on Antarctica. *Journal of Climate*, 29(5), 1797-1808.
- Weng, H., Behera, S. K., & Yamagata, T. (2009). Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics*, 32(5), 663-674. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0394-6>
- Yepes, J., Poveda, G., Mejía, J. F., Moreno, L., & Rueda, C. (2019). Choco-jex: A research experiment focused on the Chocó low-level jet over the far eastern Pacific and western Colombia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(5), 779-796.