Análisis de la variabilidad climática en el parque el Tamá en su área de influencia con la cuenca del río Táchira

Darly Yusendy Carvajal Velasco

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Ingeniería Ambiental

Pamplona

2024

Análisis de la variabilidad climática en el parque el Tamá en su área de influencia con la cuenca del río Táchira

Darly Yusendy Carvajal Velasco

1005059963

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

DIRECTOR (A)

María Esther Rivera

PhD. Hidrología & Lic. Matemáticas y Física

CODIRECTOR

Jesús Ramón Delgado Rodríguez

Geólogo MSc. Geotecnia

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Ingeniería Ambiental

Pamplona

2024

Dedicatoria

A Dios, por acompañarme en el transcurso de mi vida, aquel ser invisible pero presente en mi corazón, esa voz de aliento y tranquilidad en medio de la tormenta, que me brinda fortaleza y amor incondicional.

A mis padres, por darme la vida, luchar constantemente por sacarme adelante, dejar a un lado sus sueños por apoyar los míos, les dedico mi esfuerzo y dedicación a quienes me aman y amo con todas las fuerzas de mi corazón.

Agradecimientos

A Dios, por darme salud, resiliencia y sabiduría para enfrentar cada situación u obstáculo que contrae la vida. A mis padres por apoyarme tanto emocional como económicamente en la travesía de este semestre lleno de nuevas experiencias. A mis hermanas y sobrino por estar a mi lado siempre, brindándome amor absoluto. Por supuesto, a mi compañera de vida y aventuras, Sally, por ser la guardiana permanente en mis desvelos.

Por otro lado, a mis mentores, mi ejemplo a seguir y de gran admiración, María Esther Rivera y Jesús Ramón Delgado Rodríguez, por implantar su conocimiento con amor y dedicación, por abrazarme en mis momentos débiles y acompañarme en mis avances. A mis compañeras de vida universitaria, Angelica Medina, Daniela Arango y Zara Torres por alegrar mis días en esta etapa tan bonita, y acompañarme en triunfos y derrotas.

A los funcionarios del Parque Nacional Natural Tamá, por ofrecer su espacio y tiempo para poder concluir mi proyecto, por apoyarme, acompañarme y sacarme una sonrisa en este maravilloso y mágico lugar.

Para concluir, a todas aquellas personas que no nombré, pero saben lo importante que son y lo agradecida que estoy por la ayuda que me ofrecieron.

Tabla de Contenido

Resumen 14
Capítulo I 15
Introducción 15
Planteamiento del Problema 16
Justificación 17
Objetivos 18
Objetivo General 18
Objetivos Específicos 18
Alcances y Limitaciones 19
Alcances 19
Limitaciones 19
Capítulo II 20
Marco Referencial 20
Marco Contextual 20
Antecedentes 21
Marco Teórico 24
Estacional 24
Intraestacional 24
Interanual 25
Interdecadal 25
El Niño 25
La Niña 25
Fase Neutra 25
Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) 26
Índice de Sequía de Caudales (SDI) 26
Oferta y Demanda Hídrica 27
Calidad del Agua 27
Programas utilizados 28
Marco Legal 29
Capítulo III 33

Metodología 33
Etapa 1. Caracterización Físico-Morfométrica de la Zona de Estudio 33
Etapa 2. Determinación de la Cobertura Vegetal, Usos del Suelo, Geología y Litología de la Zona. 34
Etapa 3. Análisis del Comportamiento Temporal de las Variables Hidrometeorológicas en el PNN Tamá. 35
Recopilación de Variables Hidrometeorológicas e Índices Macroclimáticos 35
Análisis Descriptivo y Exploratorio de Datos 35
Descripción de Anomalías 36
Prueba de Normalidad 36
Prueba de Raíz Unitaria y Estacionariedad 36
Etapa 4. Determinación de la Influencia de las Variables Hidrometeorológicas en el Comportamiento del Recurso Hídrico que Abarca la Zona Protegida. 37
Análisis Correlacional 37
Estimación de Índices de Sequía 37
Medición de Caudal y Parámetros de Calidad del Agua 38
Determinación de la Oferta y la Demanda Hídrica 38
Etapa 5. Planteamiento de Alternativas que Ayuden a la Mejora de las Decisiones que Contribuyan a la Conservación y Manejo de la Cuenca Estudio en el PNN Tamá. 39
Estudio de Alternativas 39
Implementación de Actividades de Concientización y Participación con la Comunidad, Enfocadas en la Preservación de la Cuenca del Río Táchira 39
Capítulo IV 40
Resultados y Discusión 40
Caracterización Físico-Morfométrica de la Cuenca Estudio 40
Mapa de Cobertura y Usos de la Tierra 44
Verificación de Cobertura Vegetal, Usos del Suelo, Litología y Geología en el Área de Estudio 50
Caracterización Actual del Suelo y Verificación Litológica en la Zona de Estudio 57
Muestreo de Suelo 57
Granulometría 58
Análisis e Interpretación de las Variables Hidrometeorológicas Seleccionadas 59

Datos Faltantes 59
Análisis Descriptivo y Exploratorio de Datos 59
Precipitación Total Mensual 59
Temperatura Media Mensual 63
Caudal Medio Mensual 66
Climograma 69
Anomalías 70
Precipitación Total Mensual 70
Temperatura Media Mensual 72
Análisis Correlacional 74
Correlación Cruzada 78
Índices de Sequía 79
Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) 79
Índice de Sequía de Caudales (SDI) 81
Medición de Caudal y Parámetros de Calidad del Agua 82
Oferta y Demanda Hídrica 87
Alternativas de Mejora para la Toma de Decisiones en Cuanto a la Conservación de la Cuenca Estudio 91
Educación Ambiental 92
Reforestación en Áreas Degradadas 92
Diversificación de Cultivos 92
Medidas de Captación de Lluvia y Almacenamiento de Agua 93
Monitoreo Hidroclimático 93
Implementación de Actividades de Concientización y Participación con la Comunidad, Enfocadas en la Preservación de la Cuenca del Río Táchira 93
Conclusiones 95
Recomendaciones 97
Referencias 98
Anexos 106

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de delimitación de la parte alta de la cuenca del río Táchira. 21
Figura 2 Metodología del proyecto.....33
Figura 3 Delimitación de la parte alta de la cuenca del río Táchira. 40
Figura 4 Mapa de pendientes parte alta de la cuenca del río Táchira. 42
Figura 5 Curva hipsométrica parte alta de la cuenca del río Táchira.....43
Figura 6 Perfil longitudinal del cauce principal parte alta de la cuenca del río Táchira.....44
Figura 7 Mapa cobertura de la tierra parte alta de la cuenca del río Táchira.....44
Figura 8 Distribución porcentual cobertura de la tierra. 45
Figura 9 Mapa conflicto uso del suelo parte alta de la cuenca del río Táchira. 46
Figura 10 Mapa vocación uso del suelo parte alta de la cuenca del río Táchira.....47
Figura 11 Mapa oferta ambiental parte alta de la cuenca del río Táchira. 48
Figura 12 Mapa geológico parte alta de la cuenca del río Táchira. 49
Figura 13 Mapa litológico parte alta de la cuenca del río Táchira. 50
Figura 14 Localización de las estaciones de campo en la zona de estudio. 51
Figura 15 EST-02 51
Figura 16 EST-04 51
Figura 17 EST-06 52
Figura 18 EST-07 52
Figura 19 EST-09 53
Figura 20 EST-10 53
Figura 21 EST-11 54
Figura 22 EST-15 54
Figura 23 EST-19 54
Figura 24 EST-20 55
Figura 25 EST-24 55
Figura 26 EST-25 55
Figura 27 EST-27 56
Figura 28 EST-28 56
Figura 29 EST-30 56
Figura 30 EST-31 56
Figura 31 Puntos de muestreo de suelo. 57
Figura 32 Salida de campo para el muestreo de suelo. 57
Figura 33 Muestras de suelo recolectadas. 58
Figura 34 Curva granulométrica. 58
Figura 35 Imputación de datos estación OROCUE TAMA [16017070]. 59
Figura 36 Variación temporal de precipitación total mensual. 60
Figura 37 Histograma precipitación total mensual. 61
Figura 38 Diagrama de cajas y bigotes precipitación total mensual. 61
Figura 39 Gráfico Q-Q precipitación total mensual. 62

Figura 40 Autocorrelograma precipitación total mensual. 62
Figura 41 Variación temporal de temperatura media mensual. 63
Figura 42 Histograma temperatura media mensual. 64
Figura 43 Diagrama de cajas y bigotes temperatura media mensual. 64
Figura 44 Gráfico Q-Q temperatura media mensual. 65
Figura 45 Autocorrelograma temperatura media mensual. 65
Figura 46 Variación temporal de caudal medio mensual. 66
Figura 47 Histograma caudal medio mensual. 67
Figura 48 Diagrama de cajas y bigotes caudal medio mensual. 68
Figura 49 Gráfico Q-Q caudal medio mensual. 68
Figura 50 Autocorrelograma caudal medio mensual. 69
Figura 51 a) Climograma b) Diagrama ombroclimático. 70
Figura 52 Anomalías precipitación total mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual. 70
Figura 53 Gráfico Q-Q anomalías precipitación total mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual. 71
Figura 54 Autocorrelograma precipitación total mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual. 72
Figura 55 Anomalías temperatura media mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual. 72
Figura 56 Gráfico Q-Q anomalías temperatura media mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual. 73
Figura 57 Autocorrelograma temperatura media mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual. 74
Figura 58 Comportamiento de las variables evaluadas. a) ONI y b) MEI.v2 76
Figura 59 Comportamiento de las variables hidrometeorológicas. a) TMAX vs Q y b) PR vs Q. 77
Figura 60 Correlograma cruzado. a) PR vs ONI y b) TM vs ONI. 78
Figura 61 Correlograma cruzado. a) PR vs MEI.v2 y b) TM vs MEI.v2. 79
Figura 62 Índice de sequía estandarizado SPI 80
Figura 63 Valores de SPI vs ONI y MEI.v2. 80
Figura 64 Índice de sequía de caudales SDI 81
Figura 65 Ubicación puntos de monitoreo de agua. 82
Figura 66 Monitoreo de agua. 82
Figura 67 Caudal en los tres puntos de monitoreo del agua. 83
Figura 68 Temperatura en los tres puntos de monitoreo del agua. 84
Figura 69 pH de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua. 84
Figura 70 Oxígeno disuelto de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua. 85
Figura 71 Conductividad de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua. 85

Figura 72 Resistividad de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua. ...86
Figura 73 Salinidad de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua. 86
Figura 74 Sólidos disueltos totales de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua. 87
Figura 75 Datos personales. a) Edad, b) Sexo.. 87
Figura 76 Caracterización de vivienda. a) Número de personas que habitan en el hogar, b) Tipo de servicio sanitario y drenaje y c) Sistemas de almacenamiento de agua. 88
Figura 77 Usos del agua. a) Uso del recurso hídrico y b) Fuente abastecedora 88
Figura 78 Uso agrícola. a) Tipos de cultivos y b) Área de los cultivos 89
Figura 79 Uso pecuario. a) Tipo de animales y b) Cantidad de animales grandes. 89
Figura 80 Problemas con la calidad del agua potable. 89
Figura 81 Variabilidad climática. a) ¿Ha presenciado aumento o disminución de precipitación en los últimos años?, b) ¿Ha presenciado aumento o disminución de temperatura en los últimos años? Y c) ¿Qué eventos naturales ha evidenciado? 90
Figura 82 Curva de duración de caudales en el PNN Tamá. 91
Figura 83 Demanda hídrica sectorizada. 91
Figura 84 Charlas de educación ambiental. 94

Lista de Tablas

Tabla 1 Valores de clasificación SPI 26
Tabla 2 Valores de clasificación SDI 27
Tabla 3 Marco Legal 29
Tabla 4 Parámetros físicos de la parte alta de la cuenca del río Táchira. 40
Tabla 5 Parámetros de forma de la parte alta de la cuenca del río Táchira. 41
Tabla 6 Parámetros de relieve de la parte alta de la cuenca del río Táchira. 41
Tabla 7 Parámetros de drenaje de la parte alta de la cuenca del río Táchira. 43
Tabla 8 Distribución cobertura de la tierra. 45
Tabla 9 Porcentaje de textura del suelo. 59
Tabla 10 Estadística descriptiva precipitación total mensual. 60
Tabla 11 Prueba de normalidad precipitación total mensual. 62
Tabla 12 Prueba de raíz unitaria y estacionariedad precipitación total mensual. 63
Tabla 13 Estadística descriptiva temperatura media mensual. 63
Tabla 14 Prueba de normalidad temperatura media mensual. 65
Tabla 15 Prueba de raíz unitaria y estacionariedad temperatura media mensual. 66
Tabla 16 Estadística descriptiva caudal medio mensual. 67
Tabla 17 Prueba de normalidad caudal medio mensual. 68
Tabla 18 Prueba de raíz unitaria y estacionariedad caudal medio mensual. 69
Tabla 19 Prueba de normalidad anomalías precipitación total mensual. 71
Tabla 20 Prueba de raíz unitaria y estacionariedad precipitación total mensual. 72
Tabla 21 Prueba de normalidad anomalías temperatura media mensual. 73
Tabla 22 Prueba de raíz unitaria y estacionariedad temperatura media mensual. 74
Tabla 23 Matriz de correlaciones anomalías. 75
Tabla 24 Matriz de correlaciones originales. 77
Tabla 25 Correlaciones cruzadas variables meteorológicas e índices macroclimáticos. 78
Tabla 26 Frecuencia de ocurrencia SPI. 80
Tabla 27 Frecuencia de ocurrencia SDI. 81
Tabla 28 Caracterización puntos de monitoreo de agua. 82
Tabla 29 Parámetros in situ parte alta de la cuenca del río Táchira. 83

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Índice de escasez de agua.....27
Ecuación 2 Prueba Tn 36

Lista de Anexos

Anexo 1 Encuesta para la determinación de la demanda hídrica. 106

Resumen

La cuenca del río Táchira juega un papel fundamental en cuanto a la oferta hídrica por su carácter binacional, siendo un recurso vital para la comunidad aledaña. No obstante, la disponibilidad y calidad del agua pueden verse comprometidos por diversos factores, siendo uno de ellos, la variabilidad climática, ya que la presencia de eventos extremos u anormales como variedad en la precipitación y temperatura, pueden afectar las condiciones hidrológicas y las características subyacentes de la cuenca hidrográfica, lo que a su vez genera un impacto en la gestión del recurso hídrico.

El actual proyecto se basa en la evaluación sobre la incidencia de la variabilidad climática en los ecosistemas que abarca el Parque Nacional Natural Tamá (PNN Tamá), implicando directamente al recurso hídrico, siendo la parte alta de la cuenca del río Táchira el área de estudio seleccionada. La metodología de investigación se fundamentó en la caracterización de la cuenca, su morfometría, cobertura vegetal, usos del suelo, geología y litología predominantes. Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis de las variables hidrometeorológicas presentes en la zona de estudio, con el fin de detectar y correlacionar comportamientos inusuales con eventos de variabilidad climática, utilizando como base el Índice Oceánico de El Niño (ONI) y el Índice ENSO multivariado Versión 2 (MEI.v2). De igual modo, se midieron y evaluaron parámetros fisicoquímicos de calidad del agua en los últimos meses, al igual que la estimación de la oferta y la demanda hídrica en el área de influencia, con el objetivo de describir el estado actual de la cuenca. Con base en los resultados obtenidos, se buscó el planteamiento de medidas de manejo y conservación, en conjunto al aporte de una base investigativa para la actualización de información al banco de datos del PNN Tamá.

En este orden de ideas, se identificó una cuenca montañosa y en equilibrio, con media a alta producción sostenida de caudales y moderado potencial de crecientes, característica de una pendiente fuertemente accidentada, indicando un aumento en la escorrentía superficial y arrastre de materiales. De igual modo, con predominio de pastos limpios y bosques, con depósitos aluviales, y formaciones geológicas, obteniendo así, una cuenca distintiva de suelo arcilloso y arenoso. Por otro lado, se demostró la incidencia de los índices macroclimáticos resaltando las fases cálidas y frías en cuanto al comportamiento temporal de la precipitación y la temperatura en la zona de estudio, influyendo así, indirectamente en la conducta hídrica de la cuenca evaluando valores de caudal. De esta manera, se demostró que, en la fase cálida (El Niño), la temperatura tiende a aumentar, mientras que la precipitación y el caudal disminuyen; a diferencia de la fase fría (La Niña), la temperatura disminuye y la precipitación y el caudal suelen aumentar. Por otro lado, los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua medidos en los últimos meses, arrojaron valores bajos o dentro del límite máximo permisible para consumo humano o vida acuática, lo cual se confirma con base en las encuestas realizadas a la comunidad, y una estimación aceptable en cuanto al índice de escasez, sin experimentar presiones significativas de la demanda sobre el recurso hídrico disponible. Planteando así finalmente, las medidas para la toma de decisiones en pro de la conservación del VOC instaurado por el PNN Tamá.

Palabras clave: Variabilidad climática, correlación, hidrología, climatología, cuenca, Tamá.

Capítulo I

Introducción

"El Niño no solo se refiere al niño varón, sino también al niño Jesús. Los pescadores de Sudamérica, que conocen y describen el fenómeno desde hace mucho tiempo, lo llamaron "El Niño" porque algunos de sus efectos más importantes se producen en torno a la navidad, y el nombre prevaleció" (Borunda, 2022). Con base en lo anterior, se infiere la ocurrencia de la variabilidad climática desde hace cientos de años atrás, y, por ende, la importancia de su estudio actualmente, con el objetivo de comprender mejor cómo funciona el sistema climático y cómo puede cambiar con el tiempo, generando así, implicaciones significativas en diversos aspectos de la vida humana, desde la agricultura y la seguridad alimentaria hasta la gestión de recursos hídricos y la planificación urbana. Por tal motivo, entender y adaptarse a la variabilidad climática es fundamental para enfrentar los desafíos que presenta y minimizar sus impactos negativos.

Por otro lado, el Parque Nacional Natural Tamá se trata de una reserva natural de vital importancia para los Andes Nororientales, debido a su aporte tanto ecosistémico como biodiverso. La parte alta de la cuenca del río Táchira se caracteriza por ser una fuente rica en aporte hídrico, condiciones que requieren de conservación y priorización, sin embargo, hay factores que son difíciles de controlar, recalcando principalmente los climatológicos, allí es donde se asocia el término "variabilidad climática", dando lugar a variaciones en los patrones climáticos de la zona, generando así, impactos negativos tales como, cambios en la vegetación, disponibilidad del agua e interacción entre las especies, representando un desafío importante para la gestión de áreas protegidas y la conservación de la biodiversidad. De igual forma, simbolizando un desafío para la comunidad abastecida en las zonas de amortiguación, debido a los usos tanto domésticos como agropecuarios predominantes.

Por lo anterior, la finalidad del proyecto es evaluar la incidencia de la variabilidad climática a una escala interanual, teniendo en cuenta la presencia de El Niño y La Niña utilizando como base metodológica correlaciones en conjunto de los índices macroclimáticos ONI y MEI.v2. Además de la caracterización de cobertura vegetal, usos del suelo, geología y litología de la zona, en conjunto de factores fisicoquímicos que determinan la calidad del agua y los conceptos personales de la población en cuanto al recurso hídrico y sus experiencias frente al fenómeno evaluado.

En el transcurso del documento se encuentra la siguiente información: 1. Planteamiento del problema, explicando la situación actual de la problemática, y así, dando origen a la investigación. 2. Justificación, proporcionando las razones que respaldan el desarrollo del proyecto. 3. Objetivos, determinando los propósitos del proyecto a cumplir en ciertos lapsos de tiempo. 4. Alcances y limitaciones. 5. Marco referencial, conformado por el marco contextual, marco teórico y marco legal. 6. Metodología, apartado que describe los procesos y métodos llevados a cabo para implementar la solución del proyecto. 7. Resultados y discusión. 8. Conclusiones y recomendaciones.

Planteamiento del Problema

La variabilidad climática en las últimas décadas ha generado diversos desafíos y problemáticas en la región, ocasionando impactos significativos en la sociedad, la economía y el medio ambiente. Como resultado, se han observado eventos extremos como sequías, olas de calor, grandes tormentas, entre otros, que afectan la calidad de vida y ponen en riesgo el desarrollo socioeconómico. En particular, estas condiciones comprometen principalmente la calidad y disponibilidad de agua en las zonas más sensibles.

El PNN Tamá a pesar de ser un área de conservación de biodiversidad y protección de ecosistemas, tiende a verse vulnerado directa o indirectamente por impactos que se generan a raíz de actividades antropogénicas o eventos naturales, siendo uno de ellos los patrones climáticos inusuales, alterando el curso natural de los ecosistemas y, por ende, los servicios que estos brindan a la comunidad. La parte alta de la cuenca del río Táchira, puede enfrentarse a dichas consecuencias dependiendo de la magnitud y duración del suceso climático al que está expuesta, así como su sensibilidad y capacidad de adaptación. Según el Plan de Manejo Ambiental (PMA) del parque, no se cuenta con información completa sobre evaluación de eventos de variabilidad climática en la zona de estudio, sin embargo, especifica la ocurrencia de crecientes súbitas y una disminución de caudal en épocas de sequía, sumando la susceptibilidad por desarrollos agropecuarios que fácilmente tienden a expandirse y afectar los sectores de la cuenca. De igual modo, no hay hasta la fecha investigaciones puntuales con base al monitoreo y análisis hidroclimático para la interpretación y manejo del área protegida. Por lo tanto, el proyecto busca ampliar el estudio en cuanto al comportamiento de variables hidrometeorológicas, de esta manera, determinando la presencia de eventos de variabilidad climática y su incidencia en el recurso hídrico.

A partir de lo anterior, se plantean las siguientes preguntas investigativas

¿Qué incidencia puede tener en la parte alta de la cuenca del río Táchira la variabilidad climática?

¿La variabilidad climática puede influir en la frecuencia e intensidad de eventos extremos en la zona de estudio?

Justificación

La cuenca del río Táchira es de vital importancia debido a su carácter binacional, especialmente en su parte alta, ya que cuenta con condiciones óptimas que contribuyen a la calidad y cantidad de agua, siendo una gran zona de recarga hídrica y aporte significativo de servicios ecosistémicos. Es definida por la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) como un Área de Reserva de Recursos Hídricos, priorizada por sus características de ubicación, caudal y población que abastece. Por tal motivo, el PNN Tamá en su plan de manejo ambiental la describe como un valor objeto de conservación (VOC), donde se requieren diversos estudios para la proyección e implementación de medidas de manejo. De esta manera, el proyecto contribuirá al complemento de información en la línea base para el análisis hidroclimático del parque natural, con énfasis en la incidencia de la variabilidad climática, permitiendo una interpretación más precisa de los patrones y cambios climáticos a lo largo del tiempo, y así, dado el caso, sugerir alternativas para su manejo, siendo esenciales para garantizar la sostenibilidad ambiental de la cuenca y el beneficio de la comunidad abastecida.

Por otro lado, es fundamental para el PNN Tamá tener acceso a información relevante acerca del estado actual de la cuenca alta del Táchira, incluyendo sus zonas de amortiguación, contando con la participación e interés de la comunidad aledaña. En este sentido, el proyecto también tiene como objetivo contribuir al conocimiento sobre la oferta y demanda hídrica en las zonas próximas al área protegida, así como al monitoreo de caudal y calidad del agua en puntos representativos de la cuenca. Sugiriendo de esta manera, la continuidad de dichas funciones con el fin de evaluar el cambio en el estado de la cuenca en años posteriores, y así, plantear e implementar medidas dado el caso de problemáticas o resultados no esperados.

Objetivos

Objetivo General

Analizar la variabilidad climática en el parque el Tamá en su área de influencia con la cuenca del río Táchira.

Objetivos Específicos

- Caracterizar los parámetros físico-morfométricos de la cuenca estudio.
- Determinar la cobertura vegetal, usos del suelo, geología y litología de la zona.
- Analizar el comportamiento temporal de las variables hidrometeorológicas en el PNN Tamá.
- Establecer la influencia de las variables hidrometeorológicas en el comportamiento del recurso hídrico que abarca la zona protegida.
- Plantear alternativas que ayuden a la mejora de las decisiones que contribuyan a la conservación y manejo de la cuenca estudio en el PNN Tamá.

Alcances y Limitaciones

Alcances

Con la presente investigación se logró profundizar a cerca de la variabilidad climática en la región, y su incidencia en el comportamiento temporal de las variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura y caudal) presentes en la zona de estudio, cuya evaluación se desarrolló con base en los índices macroclimáticos (ONI y MEI.v2), resaltando las fases cálidas y frías del ENOS para un lapso de tiempo del 2000 al 2023.

De igual modo, se divulgó conocimiento de dicho fenómeno y la importancia de la cuenca estudio como recarga hídrica a la población cercana, creando conciencia y entendimiento frente a su conservación, al igual, que el desarrollo de interés para la aplicación futura de medidas de adaptación y protección.

Como meta adicional, se logró compartir un fragmento del proyecto en una ponencia desarrollada por el programa de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Pamplona a estudiantes, docentes y demás público interesado en el tema con relación a la variabilidad climática y la importancia de su área de investigación.

Limitaciones

Una de las limitantes más destacadas para el desarrollo del proyecto fue la ausencia de información hidrometeorológica en el área de estudio, debido al gran porcentaje de datos faltantes y la constante suspensión de las estaciones meteorológicas presentes en la zona protegida. Por tal motivo, se recurrió a utilizar valores provenientes de satélites como Chirps y TerraClimate, al igual que la utilización de datos mínimos de caudal de la estación limnimétrica instalada previamente por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) hasta el año 2021.

Capítulo II

Marco Referencial

Marco Contextual

El Parque Nacional Natural Tamá es una reserva natural de 51,027 ha, perteneciente a la eco región del macizo Tamá, el cual es una unidad montañosa geológica y geomorfológica binacional ubicada en los departamentos de Norte de Santander y Arauca en Colombia y los estados de Táchira y Apure en Venezuela. Contiene el nacimiento de las fuentes hidrográficas Oirá, Táchira, Culagá, Jordán, Talco, San Lorenzo, Arauca y Margua que abastecen a los ríos Catatumbo y Orinoco. De igual manera, representa una variedad en cuanto a la biodiversidad de los ecosistemas páramo, bosque andino y selva húmeda tropical (Fonseca et al., 2022).

El río Táchira es una de las fuentes principales que aportan sus aguas al río Pamplonita, cuyo nacimiento se genera a 2860 msnm al noroeste del PNN Tamá y fluye alrededor del estado de Táchira, Venezuela y el departamento de Norte de Santander, Colombia, abarcando una extensión de 18,430 ha en el territorio nacional, y se caracteriza por tener pisos térmicos medio, frío y muy frío. La parte alta de la cuenca del río Táchira circula a través de los municipios de Herrán en Colombia y Rafael Urdaneta en Venezuela (Mora, 2022), comprendiendo 658 ha dentro del parque natural, lo que equivale al 0,48% de su área total (Fonseca et al., 2022).

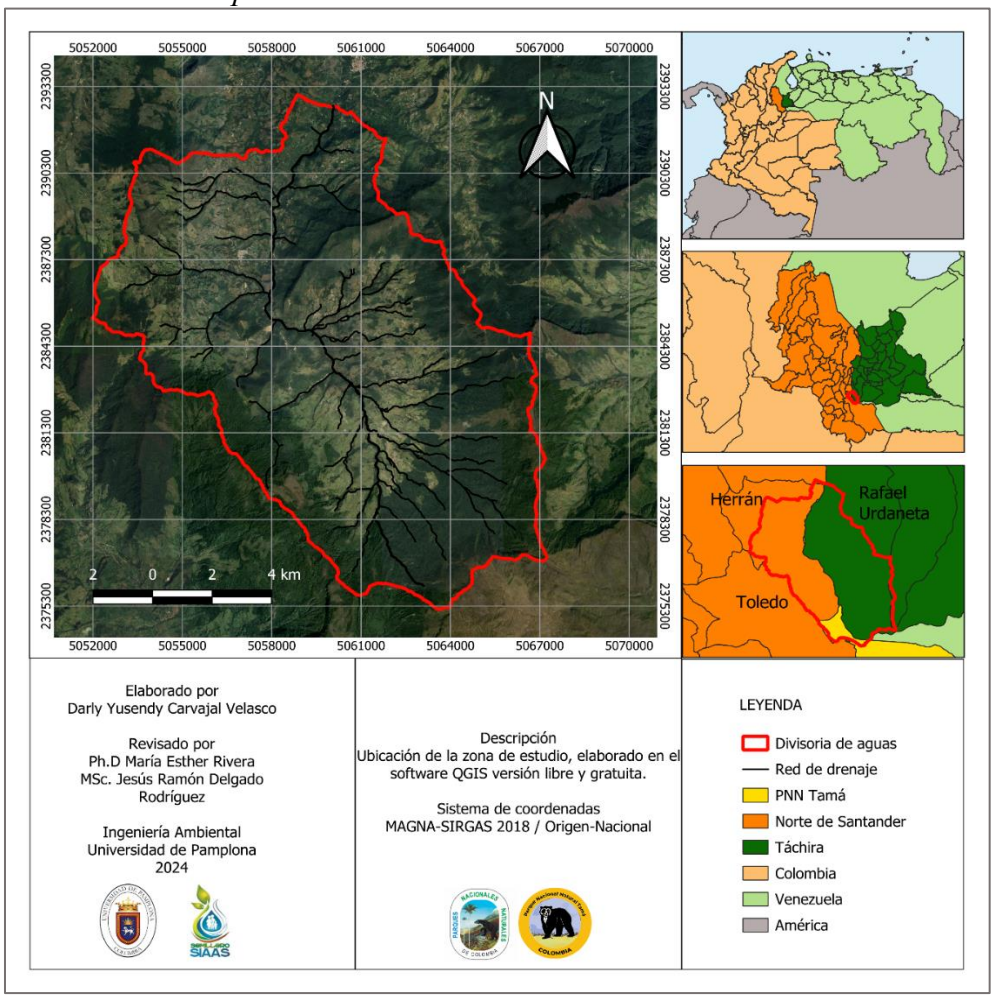
Por otro lado, la zona de estudio cuenta con diversas vías de acceso, las cuales se describen a continuación:

- Pamplona – Toledo – Chinácota – Herrán – Orocué: El tiempo total estimado para este recorrido es de 6 horas. El viaje se divide en varias etapas, con tiempos aproximados de 3 horas de Pamplona a Toledo (sede administrativa), 2 horas de Toledo al casco urbano de Herrán, 1 hora de Herrán a Betania, territorio venezolano, para finalmente caminar 40 minutos hasta las cabañas del sector Orocué (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2015).
- Cúcuta – Chinácota – Herrán – Orocué: Con un tiempo aproximado de 5 horas, el viaje se realiza tomando la vía a Herrán, continuando hacia las cabañas de Orocué, pasando por territorio venezolano. Luego, sigue el trayecto a pie durante aproximadamente 40 minutos hasta llegar a las cabañas del sector Orocué (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2015).
- Cúcuta – Toledo: El tiempo estimado para viajar desde Cúcuta a las cabañas del sector Orocué es de 3 horas hasta Toledo, luego 2 horas al casco urbano de Herrán, y finalmente 1 hora hacia las cabañas de Orocué, pasando por territorio venezolano (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2015).

En la figura 1 se muestra la ubicación de la zona de estudio resaltando su limitación con los municipios de Herrán y Toledo en el sector colombiano, y el municipio de Rafael Urdaneta en Venezuela. De igual modo, incluye la ubicación del área protegida en la cuenca, siendo en este caso, la jurisdicción del Parque Nacional Natural Tamá.

Figura 1

Mapa de delimitación de la parte alta de la cuenca del río Táchira.



Fuente: Modificado de Google Earth por Carvajal, D. (2024).

Antecedentes

La variabilidad climática trata un tema de vital importancia en cuanto al estudio del clima, refiriéndose a las fluctuaciones de temperatura, precipitación, patrones de vientos y otros parámetros meteorológicos en escalas de tiempo limitadas. Por ende, su estudio es fundamental para entender cómo dichos comportamientos inusuales pueden afectar a los ecosistemas, la sociedad, la salud y el bienestar humano, así como la formulación y toma de decisiones en cuanto a la capacidad de adaptación del clima cambiante. En seguida, se da a conocer algunos referentes y autores significativos que aportan información en cuanto a los procesos y metodologías que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del proyecto.

Según, Venegas, J (2020), en su tesis titulada “Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios en el período 2006-2018 para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito”, utilizó el software Climdex en R-Studio, con datos de precipitación y temperatura, donde se calcularon los índices de extremos climáticos (Tn90p, TNx, Tx90p, TXx, DTR, CDD, R95pTot, R99pTot, R20) para identificar si existe o no

variabilidad climática y así, determinar su alcance. Los resultados de los índices de temperatura (TXx, TNx, Tx90p, Tn90p) disminuyeron, demostrando un aumento de la variable. Por otro lado, el índice para precipitación (R20mm) aumentó, lo que quiere decir que los eventos de lluvia sobre los 20 mm incrementaron. A partir de lo anterior, se pudo concluir que la temperatura máxima, mínima y la precipitación en Quito aumentaron sustancialmente en intensidad y frecuencia, confirmando la concordancia con los efectos generados por el cambio y variabilidad climática.

Ferrelli et al. (2021), en la investigación "Evaluación de variables meteorológicas modeladas para determinar el clima de ciudades costeras argentinas", estudiaron la precisión y ajuste de precipitación, temperatura y humedad relativa obtenida a partir del Reanalysis NCEP/NCAR para ocho ciudades costeras de Argentina de diversas regiones climáticas, comparando series meteorológicas de 1960-2019 y las resultantes del Reanalysis. Se observó que la temperatura se adaptó en las escalas climáticas (60 años), moderada y mensual. La humedad relativa se correlacionó mejor en la escala estacional, durante el inverno y otoño. Por último, el ajuste de la precipitación fue adecuado en todas las escalas temporales para los climas áridos y templados. La información suministrada por el Reanalysis demostró ser beneficiosa debido a su capacidad para manifestar desviaciones térmicas y barométricas que influyen en la llegada de frentes fríos, y así, poder emplearlos en modelos de clima futuros.

Rojas & Sherezade (2022), desarrollaron su tesis con base en el "Análisis de correlación y teleconexión entre las precipitaciones extremas recurrentes del norte del Perú y anomalías de temperatura superficial del mar", donde buscaron describir analíticamente la tendencia y relación entre el comportamiento de las ATSM con precipitaciones extremas en la zona de estudio, utilizando principalmente correlaciones cruzadas con aplicación de desfases temporales para identificar la intensidad de los eventos. A partir de lo anterior, se concluyó que, las precipitaciones más intensas en el norte de Perú tienen una asociación más fuerte y una importancia estadística del 5% o menos cuando se aplican cambios temporales a las ATSM, durante 1 mes en las áreas NIÑO 1 y NIÑO 2, y durante 3 meses en las áreas NIÑO 3 y NIÑO 4. La relación más fuerte se establece entre los cambios inusuales en el TSM en el Punto de ATSM 3.3 y las precipitaciones máximas con desplazamientos temporales de 3 meses.

Mientras que, en Colombia, Barrios, J (2021), en su trabajo de investigación denominado "Índices Locales del Ciclo El Niño Oscilación del Sur para las Regiones Naturales de Colombia", utilizó información de las variables temperatura del aire y precipitación para el periodo 1971-2015 en las regiones naturales de Colombia, esto con el fin de definir índices locales del ciclo de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) con base en los indicadores IOS, ONI y las anomalías TSM, TSM 1+2, TSM 3.4 y TSM BU, utilizando principalmente correlaciones cruzadas. De igual modo, caracterizó la climatología y las anomalías de dichas zonas. De esta manera, logró observar que, las señales del ENOS se trasladan desde el Pacífico hacia el territorio en sentido oeste-este. El efecto del ENOS fue más pronunciado en el Caribe y sus islas, así como en el occidente y centro de la región Andina, y en el sur del litoral Pacífico. Los impactos del ENOS sobre la precipitación en el sur de la costa del Pacífico y la región del piedemonte amazónico presentaron diferencias con respecto al resto del país, mostrando anomalías positivas durante la fase cálida, y se concluye que, los índices establecidos revelan una variada respuesta espacial en la temperatura y la precipitación en relación con las alteraciones océano-atmosféricas en el Pacífico tropical.

Arujo y Rivera (2021), en su artículo de investigación denominado "Índices de sequía para la cuenca del río Cesar – Colombia", buscaron evaluar los índices de sequía del río Cesar teniendo

en cuenta la presencia de ciertos eventos de sequía en la zona. La metodología se basó en la búsqueda y recopilación de datos hidrometeorológicos en 20 estaciones con una serie histórica desde 1986 a 2020, posteriormente se implementó el uso de programas como Clic-MD, SPIGenerator y databaseSPEI, los cuales procesaron la información para obtener los índices SPI, SPEI e IESP. Según los resultados obtenidos, se demostró que la cuenca pasó por eventos de sequía leve a extrema según los índices SPI y SPEI, mientras que el IESP estimó eventos de sequía severa a excepcional, siendo clasificada como tipo meteorológico con presencia de sequía hidrológica. Debido a dichas condiciones, el nivel de caudal bajó considerablemente hasta afectar las actividades agrícolas y el flujo del cauce.

Por su parte, Martínez, D (2022), en su trabajo de grado "El análisis de las variables climatológicas (humedad relativa, temperatura, precipitación y evaporación) en la cuenca del río Bogotá en los años de 1996 y 2018", utilizó la geoestadística, encargándose del cálculo, simulación y predicción de datos correlacionados espacialmente, iniciando con la extracción de datos tanto geográficos como alfanúmeros de cada variable, posteriormente realizó un análisis exploratorio, teniendo en cuenta la estadística descriptiva, el análisis de gráficos y tendencias, y semivariogramas experimentales. Según los resultados obtenidos, se observó que en las áreas donde las centrales hidroeléctricas, las centrales térmicas y los embalses para abastecimiento de agua potable están en funcionamiento, se evidenciaron modificaciones en el comportamiento de las variables. De igual manera, la humedad relativa y la evaporación mostraron mayor desviación estándar, y la precipitación y la temperatura no presentaron un comportamiento muy variable.

En otro orden, regionalmente, Ortiz, Escobar y Sepúlveda (2018), en su artículo de investigación titulado "Análisis estadístico de variables climatológicas y posibles aplicaciones en la ciudad de Cúcuta", llevaron a cabo un análisis estadístico descriptivo utilizando el coeficiente de Pearson para las variables de humedad relativa, radiación solar, brillo solar, temperatura ambiente y velocidad del viento, con el objetivo de determinar la interrelación entre estas y su comportamiento en el tiempo. De igual modo, se graficaron climogramas y se calcularon regresiones lineales. Según los resultados obtenidos, se concluyó que las variables presentaron correlaciones inversas y directas, y el valor del coeficiente Pearson entre la temperatura ambiente y la humedad relativa fue de -0,9056.

Según Gélvez, Rivera y Solano (2020), en su artículo de investigación denominado "Análisis estadístico de parámetros hidrometeorológicos, fisicoquímicos y microbiológicos incidentes en la calidad de la quebrada Monteadentro", analizaron estadísticamente la precipitación, temperatura y evaporación, estimando riesgos a partir de la probabilidad de un suceso y la gravedad del impacto a partir de escalas (1-5), obteniendo el promedio de la puntuación de riesgo en la quebrada Monteadentro. También se asignaron datos faltantes con el programa estadístico SPSS, y un posterior análisis de correlación de las variables hidrometeorológicas a partir de Excel y su complemento XLSTAT, con nivel de significancia del 0,05. Se concluyó que la cuenca presenta una susceptibilidad media al riesgo, teniendo en cuenta que las actividades antropológicas y naturales pueden alterar la calidad del agua y afectar directamente a la comunidad que se abastece de la fuente, recomendando un monitoreo continuo por parte de la empresa prestadora del servicio. Concluyendo un nivel de riesgo alto, lo cual indica que el agua de la quebrada sin un previo tratamiento no es apta para el consumo humano.

Arévalo, B. (2023), en su trabajo de grado titulado "Evaluación de la influencia de la variabilidad climática en la disponibilidad del recurso hídrico de la quebrada Monteadentro en

Pamplona", llevó a cabo un análisis de los factores que inducen a la variabilidad climática, donde se determinó el fenómeno de El Niño con la escasez de agua a través de información obtenida de Climate Prediction Center- National Weather Service, analizando así, las variables de temperatura, precipitación, humedad y velocidad del viento con el software Hydrognomon, y determinando los distintos tipos de índices de sequía como (SDI, RDI, SPI, aSPI, eRDI y PET) con el software DrinC. De esta manera, se destacó la importancia de la medición de estos parámetros para determinar la influencia de la variabilidad climática en la disponibilidad del recurso hídrico.

Marco Teórico

El clima suele experimentar cambios de diversa duración a lo largo del tiempo (meses, años, siglos e incluso milenios). En distintos años, las mediciones de variables como temperatura y precipitación fluctúan por encima o por debajo de la condición normal, la cual se representa por el valor promedio de la variable estudiada en un lapso de tiempo mínimo de 30 años; la secuencia de dichas oscilaciones alrededor de la normal se conoce como variabilidad climática, y se evalúa mediante la determinación de las anomalías, utilizando la diferencia entre el valor medido de una variable climatológica y su promedio. Al analizar los registros históricos de estas anomalías en una zona determinada, es posible identificar una secuencia de ciclos interpuestos que abarcan periodos de meses, años y décadas, demostrando la variabilidad en las escalas intraestacional, interanual e interdecadal respectivamente (IDEAM-UNAL, 2018).

La principal diferencia entre el cambio climático y la variabilidad climática es el tiempo en que se mide cada uno, cuando se examinan las condiciones atmosféricas durante meses o en lapsos de tiempo cortos y medianos (hasta dos décadas) hace referencia al clima y su respectivo análisis de variabilidad climática. Mientras que, al estudiar las variables climáticas en períodos de tiempo extensos (30 años o más) y se contrastan estos promedios y valores con los datos de series de tiempo de otros períodos prolongados, es posible determinar si ha ocurrido un cambio climático (IDEAM, 2024).

Este fenómeno presenta diversas escalas temporales para establecer y regular procesos atmosféricos, siendo principalmente las siguientes:

Estacional

Hace referencia a la fluctuación del clima en un período de tiempo mensual, abarca la identificación del ciclo anual de los elementos climáticos para el estudio de la variabilidad climática. Se evidencia en zonas de latitud media, donde es común la presencia de las estaciones de invierno, verano, primavera y otoño secuencialmente, y en las zonas tropicales con una sucesión entre temporadas de lluvia y de sequía (IDEAM, 2024).

Intraestacional

Corresponde a perturbaciones que pueden influir en las condiciones climáticas durante lapsos de tiempo de decenas de días. A menudo estas oscilaciones pasan desapercibidas por su magnitud pequeña comparando con las del ciclo anual (IDEAM, 2024).

Interanual

Abarca las variaciones presentes en las variables climatológicas anualmente. El ejemplo más común se encuentra en los fenómenos conocidos como El Niño, La Niña, Oscilación del Sur y Oscilación Cuasibienal (IDEAM, 2024).

Interdecadal

Se presentan fluctuaciones climáticas de manera decadal, teniendo oscilaciones pequeñas, de esta manera, pasando inadvertida por la población (IDEAM, 2024).

De acuerdo con la Comisión Colombiana del Océano (2015), los eventos extremos son conocidos como las condiciones de variabilidad climática que se determinan por forzamientos extremos, ya sean naturales como los cambios estacionales en la intensidad de la radiación solar, o antropogénicos principalmente por el ámbito industrial y agropecuario. Dichos forzamientos pueden causar eventos climáticos extremos como sequías o precipitaciones intensas por períodos de tiempo que pueden variar desde unos pocos días, semanas, meses o años, dando lugar en este caso, a El Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es un fenómeno climático natural de gran alcance que ocasiona variaciones en la temperatura del océano en las regiones central y oriental del océano Pacífico ecuatorial, junto con alteraciones en la atmósfera suprayacente. De igual modo, ocurre en intervalos irregulares que varían entre 2 y 7 años, y se compone de tres etapas: El Niño, La Niña y una fase neutra (Organización Mundial de la Salud, 2023).

El Niño

Es un evento climático que ocurre periódicamente por el calentamiento del océano Pacífico. Impacta significativamente en el norte de la Región del Pacífico, la Región Andina y la Región Caribe. Este fenómeno puede causar cambios en los modelos de circulación atmosférica y oceánica, así como variaciones en la temperatura y la disponibilidad del recurso hídrico (Sistema de Información Ambiental para Colombia, 2024).

La Niña

Corresponde al incremento significativo de las precipitaciones y una disminución en la temperatura generalmente en las regiones Caribe, Andina y Pacífica, es conocido comúnmente como el enfriamiento anormal de las aguas ecuatoriales del Océano Pacífico Tropical (Sistema de Información Ambiental para Colombia, 2024).

Fase Neutra

Hace referencia a las condiciones dentro o cerca de lo normal, sin presencia de la fase cálida (El Niño), o su opuesto, la fase fría (La Niña) (Cea & Martínez, 2023).

Por otro lado, una cuenca hidrográfica es una zona territorial delimitada por líneas divisorias naturales donde descienden todos los flujos de agua para unirse y desembocar en un punto común, conocido como punto de salida de la cuenca, siendo un lago en el caso de una cuenca endorreica o un mar en el caso de una cuenca exorreica (Rios et al., 2013). Los eventos de variabilidad climática pueden influir en el estado medio de cuencas hidrográficas afectando la calidad y disponibilidad de agua, amenazando la biodiversidad que abarca y alterando la oferta hídrica que brinda a las poblaciones cercanas (Rojas et al., 2014). Por tal motivo, es importante la

ejecución de análisis y estudios en cuanto a las fluctuaciones y cambios en los diferentes patrones climáticos a lo largo del tiempo, esto con base en ciertos métodos y enfoques tales como, la recopilación de variables meteorológicas, organización y procesamiento de los datos, análisis descriptivo, análisis de tendencias, análisis de variabilidad interanual, análisis de eventos extremos, modelado y proyecciones futuras, interpretación y comunicación de resultados, entre otros, para posteriormente diseñar y aplicar medidas de manejo en la zona de estudio (Arévalo, 2023).

Las sequías hacen referencia a los fenómenos naturales periódicos característicos por la disminución de la precipitación y que se ven intensificadas por la demanda de agua potable, riego, usos industriales, entre otros. En cuanto a las sequías meteorológicas, estas hacen parte de la reducción en cantidad e intensidad de lluvia, así como en aumento de temperatura y evaporación debido a la mayor radiación solar causada por la falta de nubes. Por ende, dando lugar a los índices de sequía, los cuales son métodos que utilizan variables climáticas para cuantificar ciertas características de las sequías y así, asignarles un nivel de gravedad, estableciendo su inicio, desarrollo y final (Campos, 2020). En el proyecto se tuvieron en cuenta dos principalmente:

Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)

Propuesto por McKee, Doesken y Kleist (1993), se basa en un enfoque probabilístico de la precipitación total mensual (Campos, 2020), ajustándose a distribución de probabilidades y luego, transformándose en una distribución normal, de manera que el valor medio del SPI para la ubicación y el período deseado sea cero. Los valores positivos indican que la cantidad de precipitación es mayor a la mediana, mientras que, los valores negativos indican que dicha cantidad es menor, indicando una deficiencia de lluvia como se observa en la tabla 1 (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

Tabla 1

Valores de clasificación SPI

Valor de SPI	Designación
> 2	Húmedo extremo
1,50 a 1,999	Húmedo severo
1,00 a 1,499	Húmedo moderado
0 a 0,999	Húmedo ligero
0 a -0,999	Sequía ligera
-1,00 a -1,499	Sequía moderada
-1,50 a -1,999	Sequía severa
-2,00 o menor	Sequía extrema

Fuente: Cacciamani et al., (2007).

Índice de Sequía de Caudales (SDI)

Utiliza información de volúmenes de caudales o escurrimientos acumulados durante diferentes periodos de tiempo dentro de cada año hidrológico. Estos periodos escalonados son de tres, seis, nueve y doce meses, estandarizando las variaciones con respecto a la media, cuyo objetivo es comprender y predecir los patrones de flujo de agua en un área determinada (Díaz et al., 2019).

Tabla 2
Valores de clasificación SDI

Descripción	Criterio
Sin sequía	SDI ≥ 0,0
Sequía suave	-1,0 ≤ SDI < 0,0
Sequía moderada	-1,5 ≤ SDI < -1,0
Sequía severa	-2,0 ≤ SDI < -1,5
Sequía extrema	SDI < -2,0

Fuente: Díaz et al., (2019).

Oferta y Demanda Hídrica

La oferta y la demanda hídrica se determinan para comprender y gestionar el suministro de agua en diferentes contextos y áreas de estudio. Por un lado, la oferta hídrica hace referencia al agua que, después de precipitarse sobre una cuenca y hacer el proceso de evapotranspiración e infiltración correspondiente al sistema suelo-cobertura vegetal, fluye a través de los ríos y otras corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, se une a otras corrientes y finalmente llega al mar. De igual modo, corresponde al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda generada por actividades antropogénicas. Por otro lado, según el IDEAM la demanda hídrica se trata del volumen o cantidad de agua utilizado por la población y los sectores económicos, la cual se determina con base en la sumatoria de la demanda de los sectores doméstico, pecuario, agrícola e industrial (Corporación Autónoma Regional de Nariño, 2014). La relación entre la demanda y la oferta de agua se utiliza como indicador del nivel de presión sobre los recursos hídricos, expresándose en forma porcentual a través del Índice de Escasez de Agua Superficial (Domínguez et al., 2023) como lo indica la ecuación 1.

$$\mathrm{Ie} = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{O_n}} * 100\% \qquad (1)$$

Donde:
Ie = Índice de escasez (%)
D = Demanda de agua (m^3)
O_n = Oferta hídrica superficial neta (m^3)

Calidad del Agua

En otro orden de ideas, la calidad del agua en fuentes hídricas superficiales se evalúa generalmente partir de variables físicas, químicas y biológicas, ya sea individual o de manera grupal. Los parámetros fisicoquímicos proporcionan información sobre la composición química del agua y sus propiedades físicas, teniendo como ventajas su fácil implementación y análisis rápido (Samboni et al., 2007).

pH. Es una variable química que permite medir el grado de acidez de una sustancia, en este caso, el agua (García, 2019). Corresponde a la cantidad relativa de iones de hidrogeno e hidróxido en el agua. El rango varía entre 0 y 14, indicando neutralidad con el valor de 7, acidez con valores menores, y base con valores mayores (Universidad Complutense de Madrid, 2024).

Oxígeno Disuelto. Hace referencia a la cantidad efectiva de oxígeno gaseoso (O2) en el agua, el cual se expresa en volumen de agua (mg/l) o en porcentaje (%). Es considerado uno de los

factores más influyentes en la vida acuática, pues interfiere en los procesos químicos y biológicos de esta (DANE, 2011).

Conductividad Eléctrica. Es la propiedad que poseen las sustancias para conducir la corriente eléctrica, dependiendo de los iones, su concentración, valencia, movilidad y temperatura de la medición (IDEAM, 2006). La CE del agua se relaciona con la concentración de sales en disolución, generando así, iones capaces de transportar corriente eléctrica (Castro et al., 2017).

Resistividad. Corresponde a la capacidad de un medio para obstaculizar el paso de corriente eléctrica cuando se encuentra bajo la influencia de un gradiente de potencial. Esta medida representa la cantidad total de partículas cargadas presentes en una solución, sin hacer distinción entre tipos específicos de iones. Es usada comúnmente para determinar concentraciones extremadamente bajas de electrolitos o trazas de contaminantes (Hanna Instruments, 2024).

Salinidad. Se trata de la cantidad de sales disueltas en el agua, la cual puede ser de origen natural por la formación geológica, la secuencia sedimentaria o las condiciones climáticas, o por acción antropogénica a partir de vertidos y lixiviados de todo tipo. Su cantidad puede afectar la vida acuática en organismos de agua dulce y generar impactos negativos a la salud y la economía (Ribera, 2016).

Sólidos Disueltos Totales. Son la suma de todos los minerales, metales y sales disueltos en el agua, convirtiéndose en un buen indicador de calidad del agua. De igual forma, es considerado por la Agencia de Protección Ambiental de los EU (USEPA) como un contaminante secundario, sugiriendo un valor máximo de 500 mg/l en agua potable (Sigler & Bauder, 2012).

Programas Utilizados

Adicionalmente, para el proyecto se utilizaron diversos programas con el fin de cumplir los objetivos propuestos, los cuales fueron:

QGIS. Se trata de un software libre y de código abierto de gestión de información geográfica que se ejecuta en diversos sistemas operativos, utilizando formatos y funciones para datos en forma de vector, raster y bases de datos en general. De igual modo, permite visualizar, administrar, modificar, analizar datos y diseñar mapas imprimibles (Plata et al., 2021).

XLSTAT. Es un software estadístico utilizado como una extensión de Microsoft Excel para crear informes, representar datos gráficamente, elaborar modelos estadísticos, predecir demandas y realizar otras tareas similares, resaltando los análisis de series temporales (GetApp, 2024).

RStudio. Es un software gratuito y de código abierto, utilizado como un lenguaje de programación para analizar datos estadísticos avanzados e ilustrarlos de manera representativa (datacamp, 2024).

DrinC. Se trata de un programa caracterizado como una calculadora de sequía, cuyo objetivo es suministrar una interfaz sencilla para generar índices de sequía, ajustados a la evaluación de la sequía en términos meteorológicos, hidrológicos y agrícolas (DrinC software, 2024).

Cropwat. Es un programa informático diseñado para Windows que calcula las necesidades de riego de los cultivos utilizando datos sobre el suelo, el clima y los propios cultivos. Además, facilita la creación de programas de riego adaptados a diversas condiciones de manejo, así como

el cálculo del suministro de agua para distintos patrones de cultivo, siendo así, un recurso de apoyo para la toma de decisiones creado por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024)

Marco Legal

La tabla 3 incluye la normativa principal considerada para la aplicación en el desarrollo del proyecto de investigación, siendo fundamental en la metodología y las actividades planteadas, al proporcionar regulación y orientación para el progreso adecuado de los objetivos descritos, incluyendo la descripción y el responsable que la instauró.

Tabla 3
Marco Legal

Norma	Descripción	Fuente	Responsable
Decreto Ley 2811 de 1974	Se describe el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el artículo 329, **s**e define al PNN Tamá como parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, clasificado como Parque Nacional.	(IDEAM, 2024) (Fonseca et al., 2022)	Cámaras Legislativas, Consejo de Estado, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Decreto 1594 de 1984	Se reglamentan los usos del agua y residuos líquidos. Según el artículo 29, se tienen en cuenta los usos de agua para consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, industrial, recreativo y transporte.	(Función Pública, 2024)	Ministerio de Agricultura, Ministerio de Salud
Ley 99 de 1993	Según el artículo 17, se creó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios	(Congreso de Colombia, 1993)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

	Ambientales (IDEAM), siendo un organismo público a nivel nacional vinculado al Ministerio de Ambiente, cuya función es recopilar y gestionar información científica y técnica de los ecosistemas que forman parte del patrimonio ambiental del país.		
Resolución 1096 de 2000	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2020)	Ministerio de Desarrollo Económico
Decreto 291 de 2004	Se instaura al IDEAM el objetivo de determinar los mecanismos para formar y operar el Sistema de Información Ambiental con enfoque en la información meteorológica y climática, de esta manera, generando un informe sobre el estado y la evolución del clima. Además, se necesita contar con criterios técnicos y científicos para instalar y operar las estaciones meteorológicas.	(IDEAM, 2024)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Dirección del Departamento Administrativo de la Función Pública

Resolución 0865 de 2004	Se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales.	(Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, 2007)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2020)	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ministerio de Protección Social
Decreto 2372 de 2010	Se definen las categorías de manejo que conforman el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, y se dictan otras disposiciones.	(Función Pública, 2024)	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Ley 1523 de 2012	Se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.	(Función Pública, 2024)	Gobierno Nacional
Decreto 1640 de 2012	Se establecen los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.	(Función Pública, 2024)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Resolución 0330 de 2017	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las otras resoluciones.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2022)	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
Decreto 1090 de 2018	Se describe lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones.	(Función Pública, 2024)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Ley 1931 de 2018	Se determinan las directrices para la gestión del cambio climático.	(Función Pública, 2024)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Hacienda y Crédito Público
Ley 2169 de 2021	Se definen las metas y acciones mínimas con el fin de alcanzar la neutralidad de carbono, la resiliencia climática y la baja emisión de carbono en el país en el corto, mediano y largo plazo.	(Avance Jurídico, 2023)	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Hacienda y Crédito Público

Fuente: Carvajal, D. (2024).

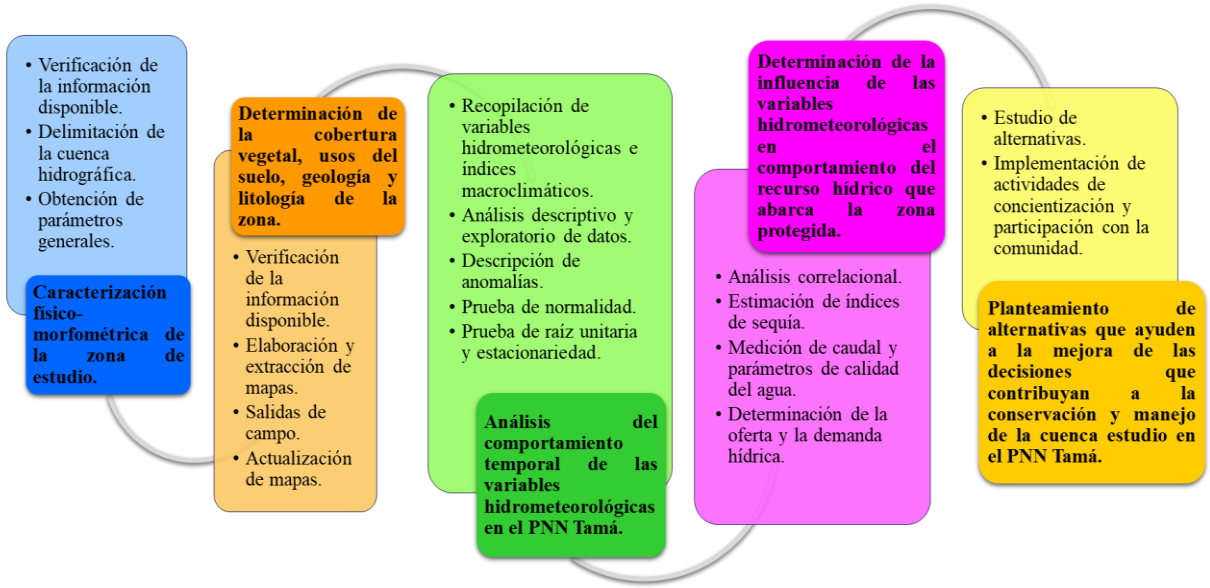
Capítulo III

Metodología

La metodología de investigación llevada a cabo se enfoca principalmente en una de tipo correlacional, con el fin de medir la relación estadística entre variables en marcos naturales, buscando su interacción sin la existencia de manipulación entre estas, así mismo, indicando en qué medida el cambio de una variable es debido a la modificación de la otra u otras (García & García, 2012).

La figura 2 contiene el diagrama de las etapas requeridas implementando la metodología seleccionada en el desarrollo del proyecto.

Figura 2
Metodología del proyecto



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Etapa 1. Caracterización Físico-Morfométrica de la Zona de Estudio

Para la delimitación de la cuenca se extrajo un polígono del área evaluada a partir del software geográfico Google Earth Pro en formato kml, trasladándolo a la herramienta de búsqueda ASF Data Search de la extensión Earth Data para generar el modelo digital de elevación (DEM) a través del satélite ALOS PALSAR, con un tamaño de píxel de 12,5 m, el cual se utilizó en el sistema de información geográfica QGIS 3.22, definiendo la divisoria de aguas y red de drenaje con coordenadas EPSG:9377 - MAGNA-SIRGAS / Origen-Nacional.

Una vez teniendo la cuenca delimitada, se realizó un estudio cuantitativo y cualitativo de los parámetros generales que compone la zona de estudio, evaluando los parámetros físicos como el área, perímetro, longitud axial, longitud del cauce principal, longitud total de los cauces, ancho promedio, ancho máximo, orden de la red de drenaje, cotas máxima y mínima de la cuenca y del

cauce principal; los parámetros de forma tales como el factor forma, el índice de circularidad de Miller, el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius y el índice de alargamiento; los parámetros de relieve como la pendiente media de la cuenca, la pendiente promedio del cauce principal, la elevación media de la cuenca y el coeficiente de masividad; los parámetros de drenaje tales como la densidad de drenaje y el coeficiente de torrencialidad; entre otros como el tiempo de concentración y el perfil longitudinal.

Etapa 2. Determinación de la Cobertura Vegetal, Usos del Suelo, Geología y Litología de la Zona.

Se elaboró el mapa de cobertura de la tierra y usos del suelo en la parte alta de la cuenca del río Táchira con base en la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia, donde se seleccionó y extrajo una imagen satelital de resolución de 30 m de Landsat 8, para su posterior ortorrectificación y procesamiento digital, cuya información fue preparada con el fin de analizar e interpretar los tipos de coberturas y usos del suelo presentes en la cuenca a partir del sistema de información geográfica QGIS 3.22.

Por otra parte, se obtuvo la geología de la zona de estudio a partir de información recopilada del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en la sección de “Estado de la Cartografía Geológica”, extrayendo así, la plancha 99 - Villa del Rosario del año 2010 y la plancha 111 – Toledo del año 2013, ambas en escala 1:100000.

Posteriormente, para la verificación de cobertura vegetal, usos del suelo y geología se realizaron salidas de campo, tomando 34 estaciones como puntos de referencia para la respectiva observación y descripción de los parámetros mencionados anteriormente en las áreas de fácil acceso. Así mismo, se utilizó la aplicación móvil Timestamp Camera Free para la georreferenciación, fecha y hora de las fotografías tomadas. A partir de lo anterior, las estaciones recorridas se catalogaron utilizando la abreviatura “EST-n", donde “n” representa el número de cada estación y se ubicaron según su sistema de coordenadas en el software geográfico Google Earth Pro, para finalmente analizar cada imagen y describirla según sus características observadas, de esta manera, cumpliendo con la actualización del mapa de cobertura de la tierra y usos del suelo. De igual forma, para complementar información con respecto a los usos del suelo, se generó una búsqueda en el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en cuanto a los mapas de conflictos de uso del territorio colombiano, clasificación de las tierras por su vocación de uso y clasificación de las tierras por su oferta ambiental a escala 1:100000 en el año 2013 para su elaboración cartográfica en la cuenca estudiada.

De igual manera, la litología se elaboró con base en la revisión de información en la plataforma “Colombia en Mapas” del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), descargando el mapa de suelos de Norte de Santander, facilitando su clasificación según los tipos de suelo e identificación de las rocas presentes en la cuenca, cuya verificación se llevó a cabo por medio de muestreos de suelo, procedimiento que se basó en la guía denominada Manual de Laboratorios de Suelos en Ingeniería Civil, por Bowles (1981), tomando como referencia seis puntos de muestreo, para posteriormente, desarrollar la curva granulométrica con base en las muestras obtenidas, calculado así, el porcentaje predominante en cuanto a la textura del suelo en el área de estudio.

Etapa 3. Análisis del Comportamiento Temporal de las Variables Hidrometeorológicas en el PNN Tamá.

Recopilación de Variables Hidrometeorológicas e Índices Macroclimáticos

En el área de influencia del PNN Tamá se filtró la información necesaria para el proyecto seleccionando las variables hidrometereológicas de precipitación, temperatura y caudal con periodicidad tanto mensual como anual, teniendo en cuenta la disponibilidad, validez y totalidad de los datos, al igual que la serie histórica de estos. Por un lado, el caudal promedio se obtuvo a partir de la estación limnimétrica OROCUE TAMA [16017070] del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) con un periodo de tiempo de 8 años (2014-2021), mientras que, los datos de precipitación total y temperatura promedio se recopilaron en la plataforma Google Earth Engine utilizando los sensores Chirps y TerraClimate respectivamente, con un periodo de tiempo de 24 años (2000-2023), esto debido a la cantidad significativa de datos faltantes y la suspensión continua en las estaciones climáticas del IDEAM en cuantos a las dos variables anteriores. De igual forma, a partir de La Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) se revisaron los índices atmosféricos y oceánicos de meso y gran escala como el Índice Oceánico de El Niño con sus siglas en inglés (ONI) y el Índice ENSO multivariado Versión 2 con sus siglas en inglés (MEI.v2) para los años correspondientes de estudio.

Debido a que las variables hidrometeorológicas generalmente cuentan con observaciones faltantes durante el desarrollo de medición en las estaciones correspondientes, causando así, registros incompletos (Aguilar et al., 2003), es importante el desarrollo del llenado de datos, el cual se da por dos tipos de métodos, los absolutos que dependen de la información de la misma estación, y los relativos que dependen de la información de estaciones cercanas con correlación entre estas y variaciones similares (Cao & Yan, 2012). Por tal motivo, se evaluó la consistencia de la información, teniendo en cuenta la cantidad de datos nulos o faltantes, siendo en el caso de las series de caudal la presencia de ciertos vacíos, por ende, se aplicó el método aritmético del promedio mensual multianual, el cual se utiliza cuando no se dispone de datos cercanos a la estación incompleta, estimando los valores faltantes con información de la propia estación (Barrios, 2021).

Análisis Descriptivo y Exploratorio de Datos

El análisis descriptivo permite ordenar, resumir y analizar una serie de datos por medio de diversos métodos, dando a conocer de manera representativa la realidad bajo investigación. Con el fin de caracterizar la distribución de un conjunto de datos se generan medidas numéricas de resumen que caracterizan la variable estudiada, utilizando número de observaciones, medidas de tendencia central, medidas de dispersión, entre otros (Epidat, 2014). Por ende, se utilizó el software estadístico de Excel XLSTAT y el entorno de software R, con el fin de generar medidas estadísticas (mínimo, máximo), medidas de tendencia central (media, mediana, moda) y medidas de dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación) evaluando de esta manera, su variación temporal. También se generaron gráficas permitiendo la organización y análisis del comportamiento y los aspectos relevantes de cada variable.

Por otro lado, el análisis exploratorio de datos (EDA) permite resumir un conjunto de datos en representaciones sencillas, esto con el fin de caracterizar inicialmente su naturaleza. En el caso de los campos de la ciencia como lo son la climatología, la meteorología y la oceanología, es relevante puesto que da a conocer un estudio preliminar de la información, dando así, resistencia

y robustez de los datos previamente a la aplicación de otros análisis estadísticos (Barrios, 2021). El actual proyecto se enfoca en tres técnicas principalmente para determinar la distribución de cada variable en la zona de estudio en cuanto a la tendencia central, dispersión y simetría, como lo son el climograma, histograma y diagrama de cajas y bigotes.

Descripción de Anomalías

Previo al análisis de anomalías, se debe tener en cuenta que, con el objetivo de realizar correlaciones precisas, la información sobre las variables a evaluar (precipitación y temperatura) requieren estar en condiciones iguales a los índices atmosféricos y oceánicos de meso y gran escala (ONI y MEI.v2). Esto significa que los datos meteorológicos también deben estar agrupados en intervalos tanto trimensual como bimensualmente según corresponda (Flórez & Torres, 2022).

En cuanto a las anomalías, estas se definen como los valores que se desvían en alguna dirección respecto al comportamiento general del resto de conjunto de datos (Marcano & Fermín, 2013). En el proyecto, su desarrollo es fundamental para retirar la estacionalidad y convertir los datos en valores adimensionales, utilizando de esta manera, la prueba de Grubbs, la cual consiste en determinar datos outlier utilizando la ecuación 2, descrita como la prueba Tn, que es aplicada para cada uno de los datos con un nivel de significancia de 0,05 (Grubbs, 1969).

$$Tn = \frac{(Xn - \overline{X})}{\delta} \qquad (2)$$

Donde:
Xn = Dato a evaluar
$\overline{X}$ = Media mensual multianual
δ = Desviación estándar multianual

Prueba de Normalidad

Una distribución normal hace referencia a la distribución de valores de probabilidad curvada y simétrica en forma de campana, con coincidencia en sus medidas de tendencia central (media, mediana y moda). Sin embargo, siendo insuficiente para confirmar la normalidad de una serie de datos, es importante realizar como opción de respaldo una prueba de normalidad, esto con el objetivo de evitar resultados sesgados o imprecisos a la hora del desarrollo de procedimientos estadísticos, donde las más comunes son la prueba de Kolmogórov-Smirnov, la prueba de Anderson-Darling y la prueba de Shapiro-Wilk (Sánchez, 2023). Para el proyecto se tuvo en cuenta el uso de los datos originales y de las anomalías de cada variable en la aplicación de esta prueba, obteniendo así, los resultados numéricos y los gráficos representativos a partir del software estadístico de Excel XLSTAT utilizando como base la prueba de Anderson-Darling y un nivel de significancia de 0,05, definiendo de esta manera, el tipo de análisis correlacional para cada variable.

Prueba de Raíz Unitaria y Estacionariedad

Una serie temporal es considerada estacionaria cuando la media y la varianza no varían estadísticamente en el tiempo, determinando así, la independencia de los datos. Previo al análisis correlacional, las series de tiempo deben cumplir con la condición de estacionariedad, pues dado el caso contrario, la estabilidad estadística disminuiría generando correlaciones espurias (Guevara, 2014). El actual proyecto tiene en cuenta el análisis de estacionariedad de los datos originales y

las anomalías generadas para cada variable utilizando el software estadístico de Excel XLSTAT obteniendo así, los autocorrelogramas, los cuales son la secuencia de autocorrelaciones en función de numero de rezagos (Romero, 2022) y las pruebas de Dickey Fuller Aumentada (ADF, 1981) y Phillips-Perron (PP, 1988), pruebas de raíz unitaria que se utilizan comúnmente en los análisis de series de tiempo para comprobar la hipótesis nula de que una variable esté integrada en orden 1 (Palma, 2020).

Etapa 4. Determinación de la Influencia de las Variables Hidrometeorológicas en el Comportamiento del Recurso Hídrico que Abarca la Zona Protegida.

Análisis Correlacional

Una vez realizado el análisis estadístico preliminar de cada serie de tiempo, se obtuvieron los coeficientes de correlación de Pearson o de Spearman, los cuales fueron seleccionados según la normalidad de las variables. El coeficiente de Pearson se caracteriza por ser un método paramétrico, pues infiere sus resultados a la población real, requiriendo una distribución normal, mientras que el coeficiente de Spearman trata de un método no paramétrico, que trabaja con la distribución muestral sin ajuste a una distribución normal (Díaz et al., 2014). Sin embargo, ambos permiten relacionar dos o más variables continuas, indicando un rango de valores de +1 a -1, un valor mayor a 0 indica una correlación positiva, obteniendo un comportamiento directamente proporcional entre las dos variables, y un valor menor a 0 una correlación negativa, revelando la inversa proporcionalidad entre estas (Ortega, 2024). De este modo, se utilizaron los datos de anomalías para correlacionar las variables de precipitación, temperatura y los índices macroclimáticos ONI y MEI.v2, obteniendo así, un comportamiento característico de dichos parámetros, y así, definir la influencia en el comportamiento hídrico de la cuenca con la posterior correlación entre los datos originales de las variables meteorológicas con los valores de caudal, utilizando en este caso, la temperatura máxima, debido a su significancia con respecto al comportamiento del flujo en la fuente hídrica.

De igual forma, se realizó el análisis de correlación cruzada entre las variables meteorológicas y los índices macroclimáticos con el fin de identificar asociaciones más claras tanto en tiempo simultaneo, como en desfases del tiempo, específicamente utilizando un retardo de 12 meses para el actual proyecto (Guevara, 2014). El procedimiento se llevó a cabo por medio el software estadístico de Excel XLSTAT, obteniendo así, los valores estadísticos junto con gráficos representativos.

Para ambos casos, se tuvo en cuenta la aplicación de la hipótesis nula Ho (rs = 0, no existe relación) y la hipótesis alternativa Ha (rs != 0, sí existe relación), utilizando en este caso un nivel de confianza del 95%, es decir, nivel de significancia p=0,05; si sucede que p < 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, dado el caso contrario, no se podrá rechazar la hipótesis nula, afirmando que la correlación no difiere significativamente de 0 (Ferrero, 2020).

Estimación de Índices de Sequía

Según La Organización Meteorológica Mundial y La Asociación Mundial para el Agua (2016) los índices son representaciones numéricas que denotan la magnitud de las sequías en un periodo de tiempo determinado utilizando datos hidrometeorológicos con el propósito de evaluar su intensidad en un entorno específico, de igual modo, permiten definir los periodos húmedos de corta duración dentro de las sequías de larga duración, al igual que los periodos secos de corta

duración dentro de largos periodos húmedos. En el caso del proyecto a trabajar se utilizó el software DrinC, teniendo en cuenta el Índice Normalizado de Precipitación (SPI), el cual utiliza información histórica de la cantidad de lluvia registrada en una zona determinada, y el Índice de Sequía de los Caudales Fluviales (SDI), siendo aquel que emplea información mensual de caudales fluviales.

Medición de Caudal y Parámetros de Calidad del Agua

Con el objetivo de caracterizar el estado actual de la fuente hídrica tanto en la zona protegida como en las áreas de amortiguación, se establecieron tres puntos representativos de monitoreo del agua a lo largo del río Táchira en la zona de estudio, el primero se ubicó en la jurisdicción del PNN Tamá sector norte Orocué (PMA-01), el segundo en Pichincha vereda Siberia, municipio de Herrán (PMA-02) y el tercero en El Tabor, frontera entre Colombia y Venezuela (PMA-03). El monitoreo se llevó a cabo los días 19 de abril y 07 de junio del 2024, en presencia de un clima variado con mínima precipitación para abril, y un día soleado sin precipitación para junio.

Con respecto a la medición del caudal se seleccionaron zonas de fácil acceso, cumpliendo con los criterios para la toma de aforos propuestos en La Subdirección Ambiental, Área metropolitana Valle Aburrá (2019), con el fin de utilizar posteriormente como equipo base el correntómetro “OTT MF pro” proporcionado por el PNN Tamá, el cual es un medidor de flujo magnético inductivo para medir velocidades por puntos en cauces descubiertos, el funcionamiento consta de un sensor que pasa a través de la sección en cada punto delimitado, midiendo de esta manera la velocidad y profundidad media en cada uno de estos, datos que fueron recopilados en el mando portátil, arrojando así, como valor final el caudal o flujo del río seleccionado (Dastec, 2012).

Los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua fueron medidos mediante el multímetro portátil HQ40d también suministrado por el PNN Tamá, el cual es un medidor digital de mano avanzado que determina el valor de parámetros como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, resistividad, salinidad y sólidos disueltos totales de una fuente hídrica en este caso. El sistema se compone de tres electrodos inteligentes (Intellical) que controlan los distintos factores a analizar, como los tipos de muestras y los entornos de trabajo relacionados con la calidad del agua, el medio ambiente y el respectivo tratamiento (Hach, 2024). En el procedimiento se seleccionó un área del río con corriente relativamente suave, esterilizando los electrodos con agua destilada para posteriormente introducirlos en la fuente, y, de esta manera, automáticamente el dispositivo arrojó en pantalla el valor dichos parámetros mencionados.

Determinación de la Oferta y la Demanda Hídrica

Para el cálculo de la oferta hídrica total se tuvo en cuenta la resolución 0865 de 2004, utilizando como base el método del caudal medio puntual a partir de la curva de duración, para posteriormente hallar la oferta hídrica neta disponible teniendo en cuenta la reducción por calidad del agua del 15 % (q85), debido a su nivel aceptable de calidad del parámetro, ya que se encuentra en la jurisdicción de la zona protegida, con mínima intervención antropogénica, y la reducción por caudal ecológico del 25% (q75).

Por otro lado, para la demanda hídrica sectorial, se tuvo en cuenta como primer punto el desarrollo de encuestas recopilando información relevante en cuanto a los usos del recurso hídrico y la población presente en la zona aferente, la cual se fundamenta y protege en la ley 1581 del

2012 para Colombia. La demanda doméstica se determinó de acuerdo a la dotación neta y dotación bruta mencionadas en la resolución 0330 del 2017. La demanda agrícola se calculó con base en la evapotranspiración del cultivo (Eto) estimado en el software gratuito y de libre acceso Cropwat y los coeficientes de cultivos (Kc) extraídos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006). Por último, para la demanda pecuaria se utilizaron los módulos de consumo encontrados en el Estudio Nacional del Agua (ENA, 2014).

Teniendo en cuenta la disponibilidad y acceso de información, el proyecto se enfocó en la estimación de la oferta y la demanda hídrica en el área protegida y sus zonas de influencia, considerando la vereda Siberia en la parte colombiana, y la aldea Betania en el sector venezolano.

Etapa 5. Planteamiento de Alternativas que Ayuden a la Mejora de las Decisiones que Contribuyan a la Conservación y Manejo de la Cuenca Estudio en el PNN Tamá.

Estudio de Alternativas

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, se formularon las medidas adecuadas para contribuir con el manejo y conservación de la parte alta de la cuenca del río Táchira y la adaptación frente a eventos de variabilidad climática, teniendo en cuenta el equilibrio y buen funcionamiento del ecosistema, el aporte de información al PNN Tamá y el beneficio de la comunidad aledaña.

Implementación de Actividades de Concientización y Participación con la Comunidad, Enfocadas en la Preservación de la Cuenca del Río Táchira

Se llevaron a cabo charlas educativas a los habitantes de las localidades aledañas a la cuenca estudio, tocando temas referentes a la variabilidad climática, los impactos que esta conlleva a los ecosistemas y la sociedad, al igual que la descripción de la zona de estudio, la importancia del Parque Nacional Natural Tamá como área de reserva y las medidas y recomendaciones para la conservación de la cuenca y los ecosistemas que la rodea, utilizando como material base folletos e información digital.

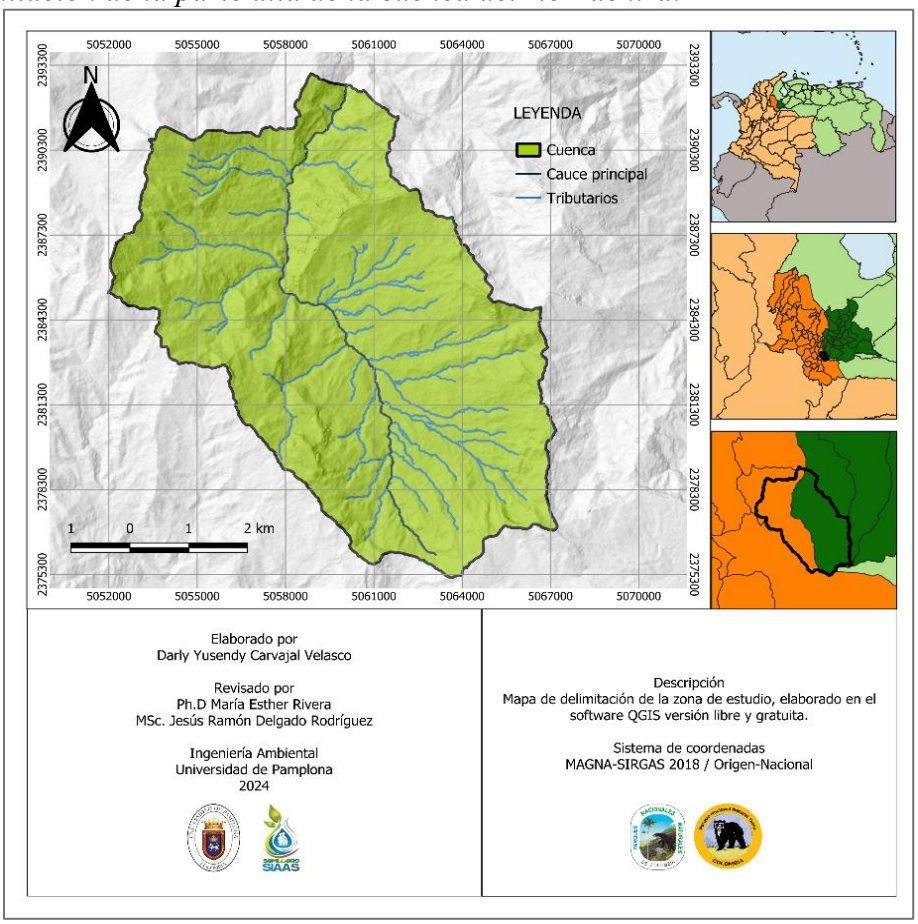
Capítulo IV

Resultados y Discusión

Caracterización Físico-Morfométrica de la Cuenca Estudio

Figura 3

Delimitación de la parte alta de la cuenca del río Táchira.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Tabla 4

Parámetros físicos de la parte alta de la cuenca del río Táchira.

Parámetros físicos			
Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidad**
Área	A	155,645	km2
Perímetro	P	64,733	km
Longitud axial	La	17,761	km
Longitud del cauce principal	Lc	22,356	km
Longitud de todos los cauces	Lx	155,491	km
Ancho promedio	W	8,763	km
Ancho máximo	l	13,057	km

Orden de la cuenca	Oc	4	Adimensional
Cota máxima de la cuenca	HM	3590	msnm
Cota mínima de la cuenca	Hm	1447	msnm
Cota máxima del cauce principal	HMc	2891	msnm
Cota mínima del cauce principal	Hmc	1449,340	msnm

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Según la tabla 5, la cuenca presenta una forma ligeramente alargada, con una producción sostenida de caudales y potencial de crecientes moderados. El índice de circularidad de Miller da como resultado un valor que determina la circularidad de una cuenca ovalada con alta producción sostenida de caudales y moderado potencial a crecientes (Duarte, 2018). El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius señala una forma oval redonda a oval oblonga con mediana susceptibilidad a crecidas y compacidad no muy alta, según Camino et al. (2018), y, por último, el índice de alargamiento representa una cuenca poco alargada con cauce principal corto, común de una zona que tiene la capacidad para manejar de manera más efectiva una precipitación intensa sin ocasionar inundaciones significativas (Fuentes, 2004).

Tabla 5

Parámetros de forma de la parte alta de la cuenca del río Táchira.

Parámetros de forma			
Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidad**
Factor forma	Kf	0,311	Adimensional
Índice de circularidad de Miller	Ic	0,467	Adimensional
Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius	Kc	1,453	Adimensional
Índice de alargamiento	Ia	1,360	Adimensional

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Los parámetros de relieve en la tabla 6, denotan una pendiente media de la cuenca con relieve fuertemente accidentado, cuya infiltración de agua disminuye, beneficiando así, la escorrentía superficial y la remoción del suelo, condiciones que inducen a eventos de crecidas y aumento de caudal en caso de tormentas, según lo especifica el Consorcio Pomca Quindío (2018). La información se confirma a partir del mapa de pendientes plasmado en la figura 4, con dominio de pendientes accidentadas a muy fuertemente accidentadas. De igual modo, la pendiente promedio del cauce principal se caracteriza como suave, indicando un flujo lento de agua y mínima susceptibilidad a procesos erosivos, según Baldeon (2016). Y el coeficiente de masividad hace referencia a una cuenca muy montañosa según Trujillo et al. (2010).

Tabla 6

Parámetros de relieve de la parte alta de la cuenca del río Táchira.

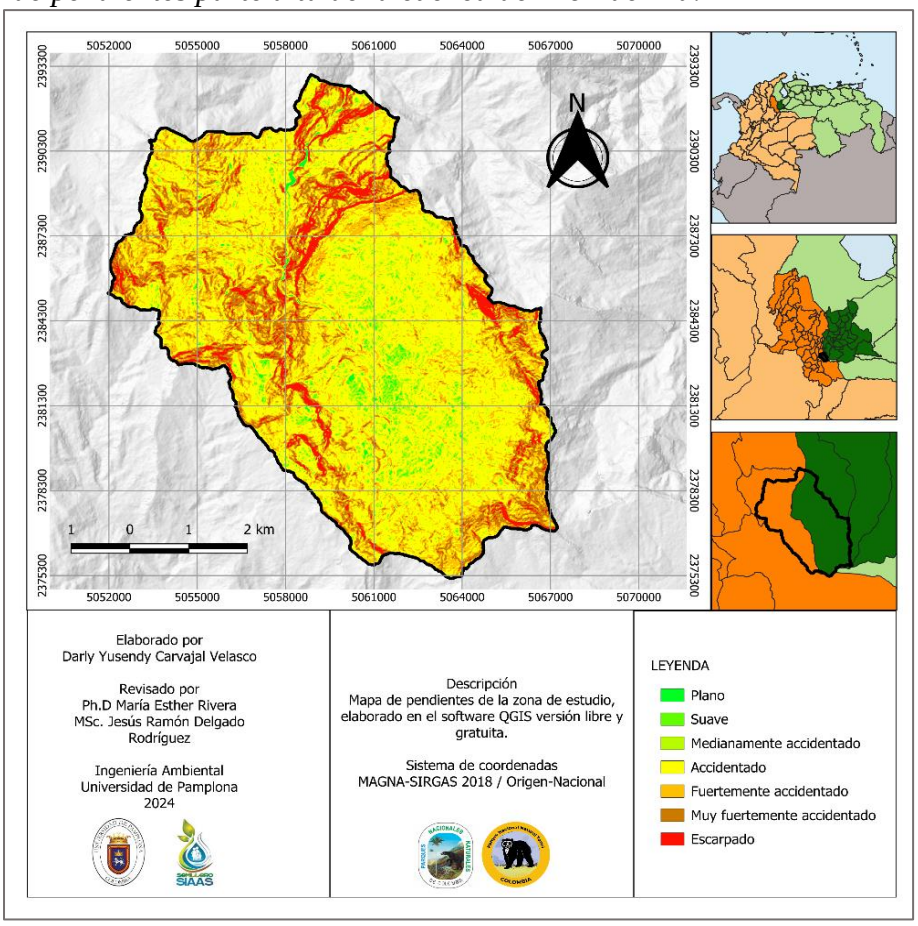
Parámetros de relieve			
Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidad**
Pendiente media de la cuenca	S	36,047	%
Pendiente promedio del cauce principal	So	6,449	%

Elevación media de la cuenca	Em	2491,444	msnm
Coeficiente de masividad	Km	16,007	msnm/km2

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 4

Mapa de pendientes parte alta de la cuenca del río Táchira.



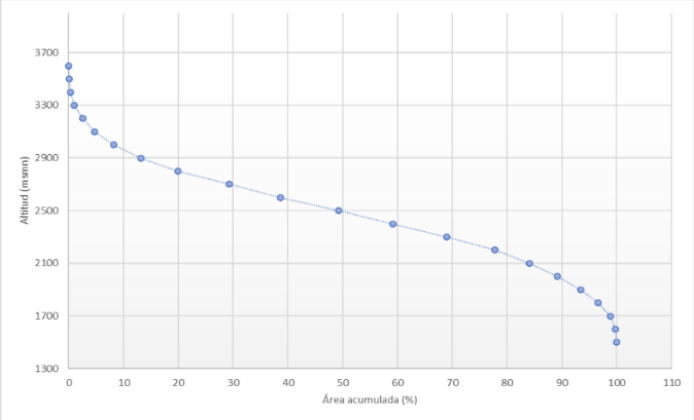
Fuente: Carvajal, D. (2024).

.

Por otro lado, la elevación media se obtuvo a partir de la curva hipsométrica representada en la figura 5, indicando que el 50% de la cuenca se encuentra por encima de los 2491,444 msnm, la cual es clasificada como un valor de elevación alta según lo planteado en Fuentes (2004). La curva hipsométrica describe una curva típica de un río en fase madura de tendencia sedimentaria, característica de una cuenca en equilibrio entre la fase de erosión y madurez del río según la clasificación estipulada en el Consorcio Pomca Quindío (2018).

Figura 5

Curva hipsométrica parte alta de la cuenca del río Táchira.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Respecto a los parámetros de drenaje a partir de la tabla 7, se tuvo en cuenta una baja de densidad de drenaje con textura gruesa y con una respuesta al evento de precipitación muy lenta, según Corradine (2017). De igual forma, el coeficiente de torrencialidad da como resultado un valor que indica una baja torrencialidad y capacidad de erosión (Camino, 2018).

Tabla 7

Parámetros de drenaje de la parte alta de la cuenca del río Táchira.

Parámetros de drenaje			
Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidad**
Densidad de drenaje	Dd	0,999	km/km2
Coeficiente de torrencialidad	Ct	0,777	Adimensional

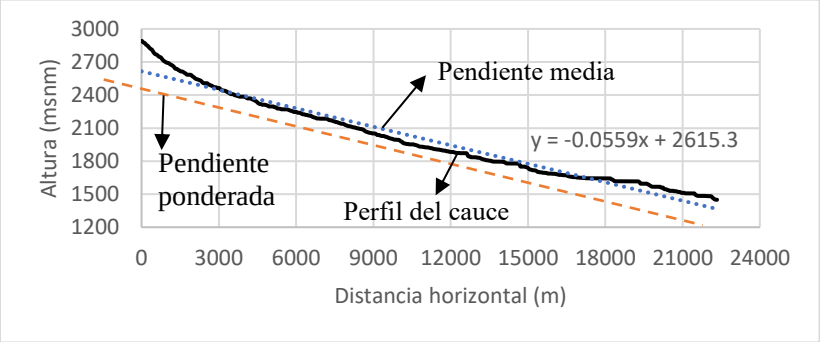
Fuente: Carvajal, D. (2024).

El tiempo necesario para que la cuenca alcance el estado estacionario durante un evento de precipitación uniforme es de 2,083 horas, aproximadamente 124,98 minutos, característico de un tiempo de concentración largo (Kirpich, 1942), debido a la pendiente suave del cauce principal.

Por último, en el perfil longitudinal del cauce principal según la figura 6, se observa que el río principal parte de los 2891 msnm y finaliza en los 1449,34 msnm, de igual forma presenta pendientes altas desde la cabecera hasta los 2400 msnm aproximadamente, indicando un aumento en la velocidad del agua por la red hídrica, siendo susceptible a procesos de erosión y arrastre de materiales (Zhicay, 2020), entre los 2400 msnm y 1600 msnm la pendiente se suaviza moderadamente representando un flujo más lento del agua, finalmente, desde los 1600 msnm hasta la desembocadura de la cuenca la pendiente es baja con mínima velocidad del agua en la red hídrica y, por ende, menos eventos erosivos y de arrastre de materiales.

Figura 6

Perfil longitudinal del cauce principal parte alta de la cuenca del río Táchira.



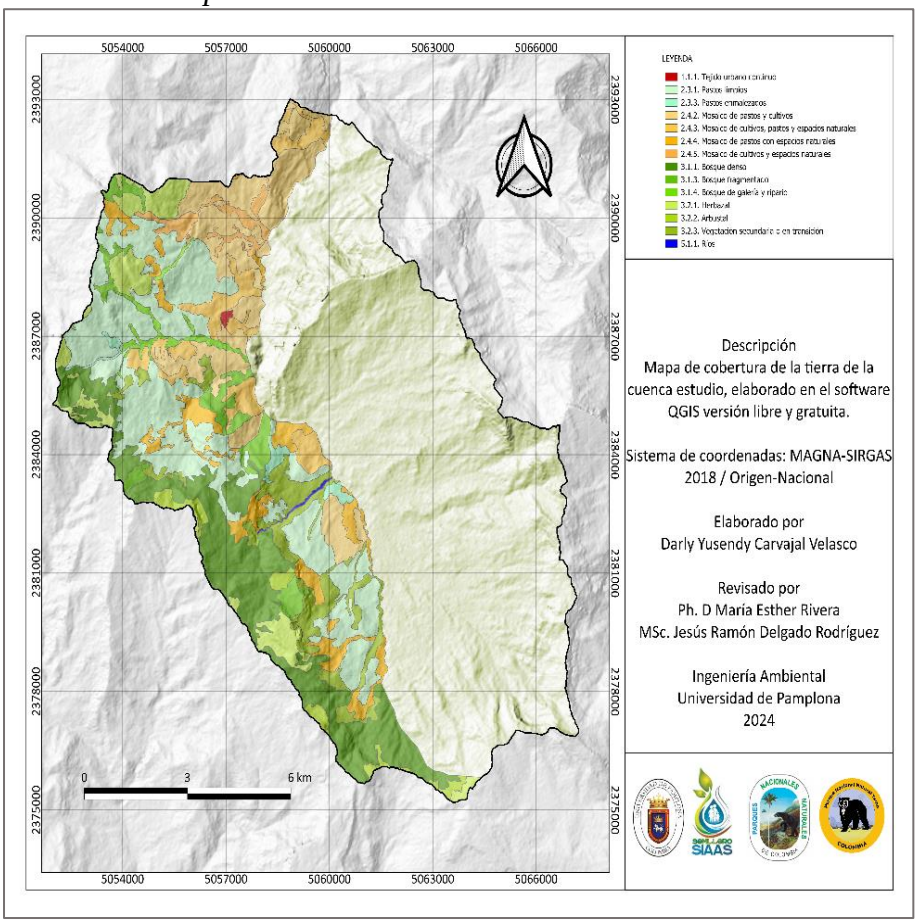
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Mapa de Cobertura y Usos de la Tierra

La figura 7 representa el mapa de cobertura de la tierra en la parte alta de la cuenca del río Táchira del territorio colombiano, obteniendo 14 tipos de cobertura vegetal, generando así, tres niveles de clasificación.

Figura 7

Mapa cobertura de la tierra parte alta de la cuenca del río Táchira.

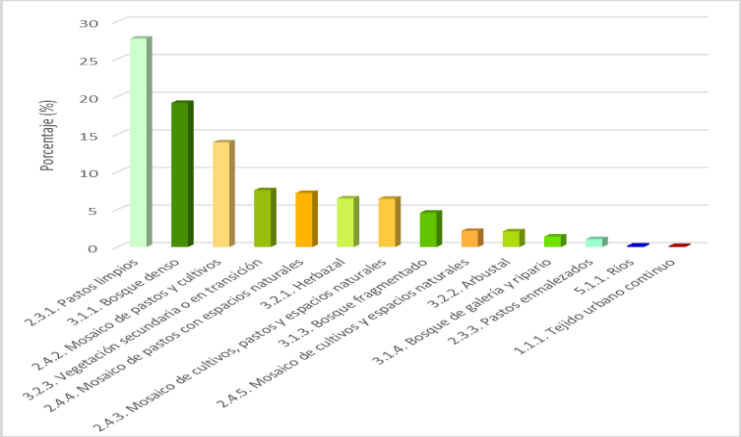


Fuente: Carvajal, D. (2024).

En la figura 8 y la tabla 8 se muestra la distribución porcentual correspondiente a la cobertura vegetal generada en la zona, evidenciando un predominio de pastos limpios con área total de 21,154 km^2 correspondiente al 27,714% de la superficie total, común principalmente en los sectores de amortiguación debido a las actividades agropecuarias desarrolladas por la comunidad aledaña, el bosque denso con un área de 14,631 km^2 y un porcentaje del 19,169%, presente en los extremos montañosos y elevados de la cuenca, y el mosaico de pastos y cultivos con área de 10,623 km^2 abarcando el 13,917% de la zona. Por otro lado, las coberturas con menor influencia son los ríos y el tejido urbano continuo, con áreas de 0,140 km^2 (0,183%) y 0,100 km^2 (0,131%) respectivamente. Por otra parte, se da a conocer que en la jurisdicción del PNN Tamá sobresalen coberturas de conservación tales como vegetación secundaria o en transición, bosque denso, arbustal, herbazal y mosaico de pastos con espacios naturales.

Figura 8

Distribución porcentual cobertura de la tierra.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Tabla 8

Distribución cobertura de la tierra.

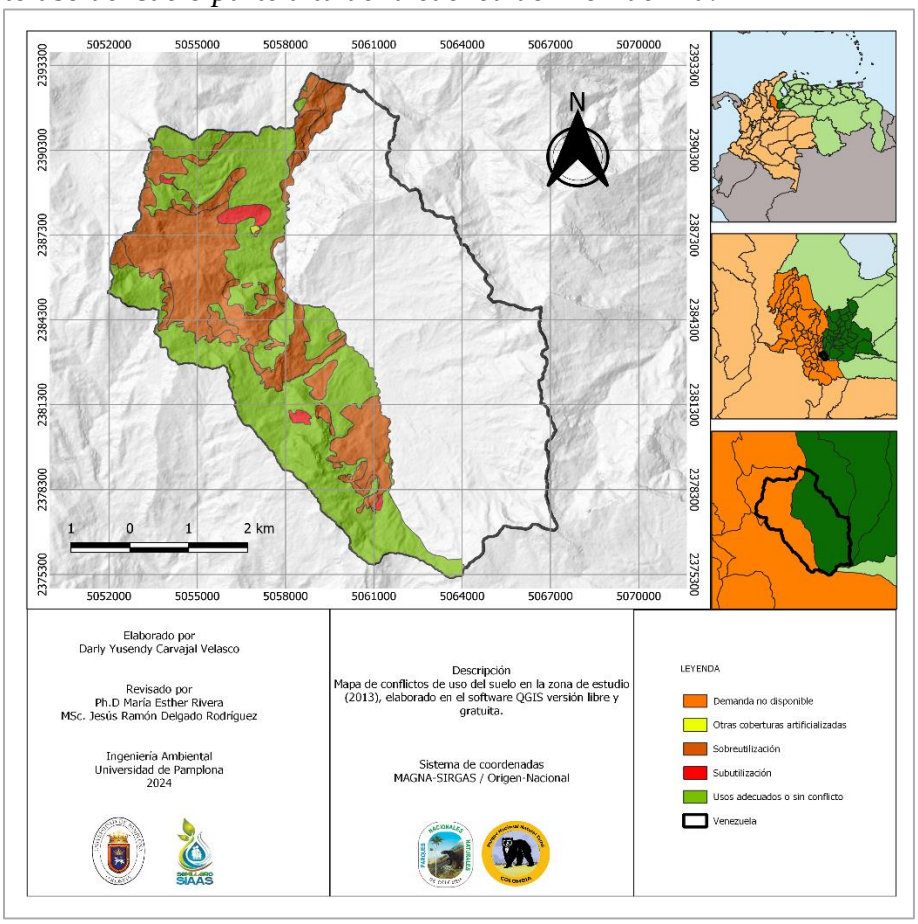
Clases	Superficie (km^2)	Porcentaje (%)
1.1.1. Tejido urbano continuo	0,100	0,131
2.3.1. Pastos limpios	21,154	27,714
2.3.3. Pastos enmalezados	0,803	1,052
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	10,623	13,917
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	4,905	6,427
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5,482	7,182
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	1,644	2,154
3.1.1. Bosque denso	14,631	19,169
3.1.3. Bosque fragmentado	3,482	4,562
3.1.4. Bosque de galería y ripario	1,072	1,405
3.2.1. Herbazal	4,929	6,458
3.2.2. Arbustal	1,593	2,087
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	5,770	7,559
5.1.1. Ríos	0,140	0,183

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Los conflictos en el uso del suelo (Figura 9) indican que en gran parte de la cuenca este es adecuado o sin conflicto, donde resalta la jurisdicción del PNN Tamá como la principal zona de dicha clasificación, de esta manera, haciendo uso coherente con la capacidad del suelo. Sin embargo, también se identificó en la zona inferior de la cuenca sobreutilización del suelo, superando su capacidad y siendo susceptible a la degradación y, por último, en el tejido urbano se presenta la subutilización correspondiente, sin conflicto ambiental y bajo aprovechamiento respecto a su capacidad.

Figura 9

Mapa conflicto uso del suelo parte alta de la cuenca del río Táchira.

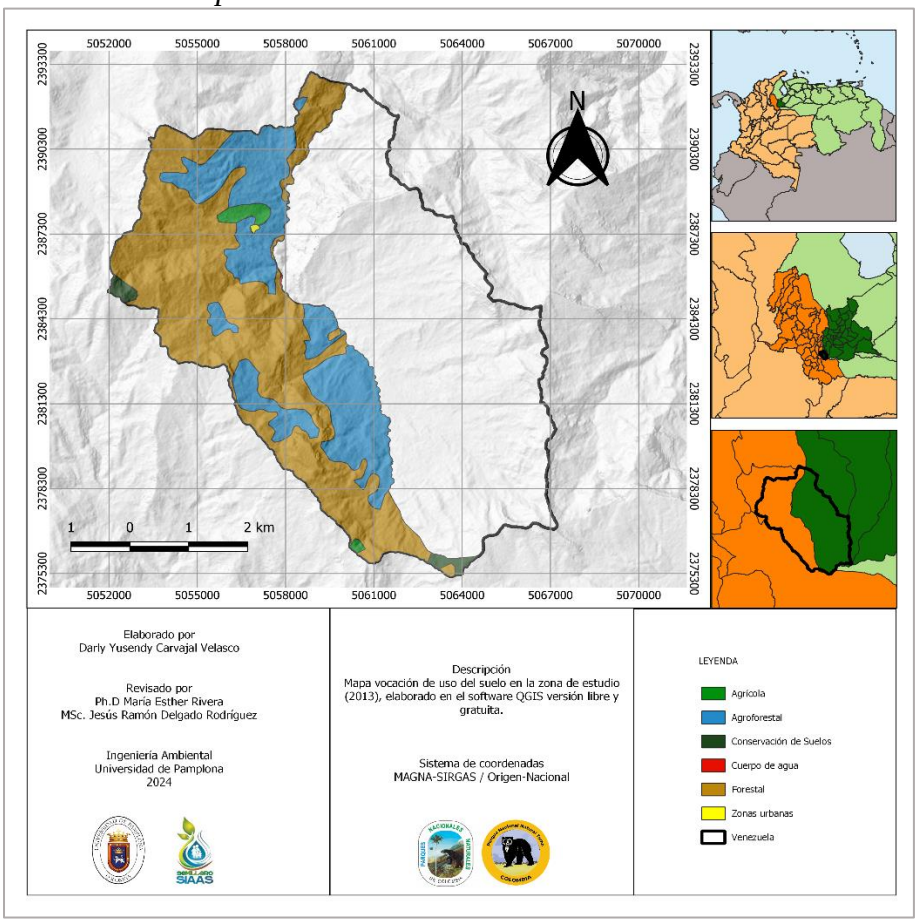


Fuente: Modificado del mapa de conflictos de uso del territorio colombiano, IGAC por Carvajal, D. (2024).

La vocación de uso del suelo (Figura 10), presenta un predominio del uso forestal a lo largo de la cuenca, característico de tierras susceptibles a procesos erosivos y escurrimiento superficial dado el caso en la ausencia de cobertura protectora (Nascimento & Wiecheteck, 2014), continuando con el uso agroforestal en ciertas áreas significativas de esta, común de las practicas económicas llevadas a cabo en la zona de estudio, donde se realizan la siembra de cultivos y árboles forestales de manera secuencial y se combinan con la implementación de prácticas de conservación del suelo (Lanza, 1999). Finalmente, destacando que en la jurisdicción del PNN Tamá gran parte es de uso forestal y ciertas zonas de usos agrícolas, agroforestales y conservación de suelos.

Figura 10

Mapa vocación uso del suelo parte alta de la cuenca del río Táchira.

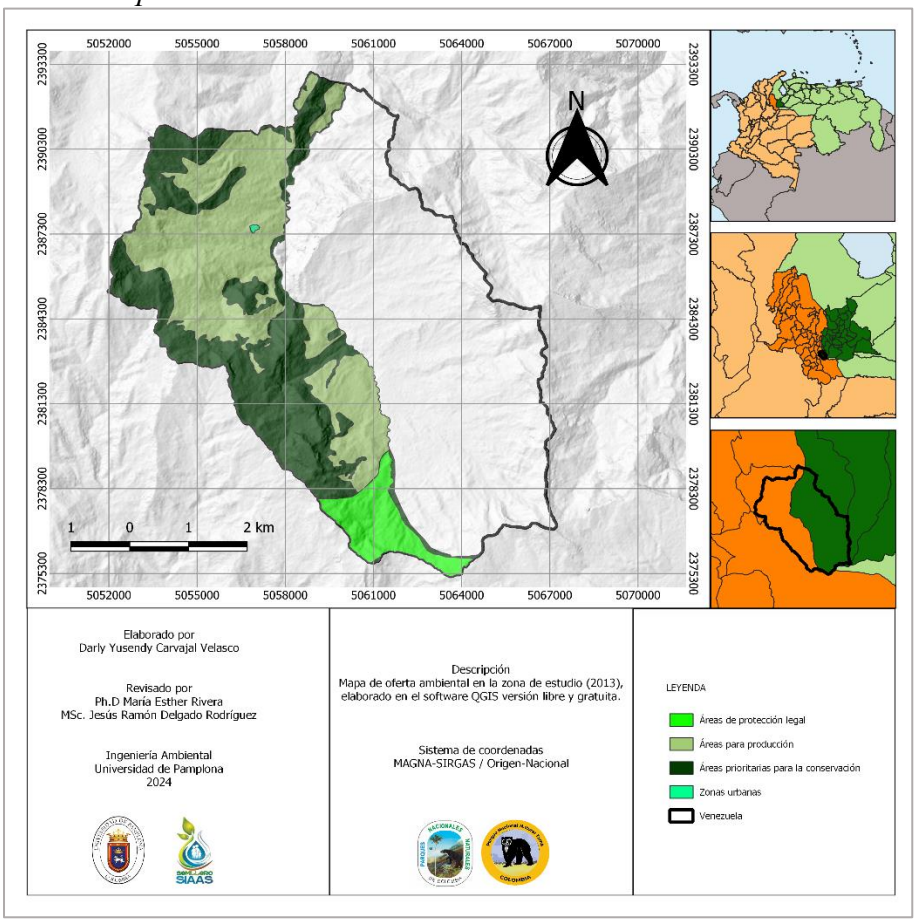


Fuente: Modificado del mapa clasificación de las tierras por su vocación de uso, IGAC Carvajal, D. (2024).

La oferta ambiental en la zona de estudio (Figura 11), destaca que la cuenca posee gran porcentaje de área de producción, común de actividades productivas para generar bienes y servicios de manera sostenible. De igual modo, se observa una oferta prioritaria para conservación, indicando áreas de importancia ecosistémica. Finalmente, seguido de una significativa parte de protección legal, zona en la jurisdicción del PNN Tamá.

Figura 11

Mapa oferta ambiental parte alta de la cuenca del río Táchira.



Fuente: Modificado del mapa clasificación de las tierras por su oferta ambiental, IGAC por Carvajal, D. (2024).

En la figura 12 se muestra el esquema geológico de la zona estudio, en la cual se observa para la plancha 99 (sector alto de la cuenca) que la formación Colon es predominante, la cual está constituida por capas medias y gruesas de lodolitas grises oscuras a negras, ciertos niveles calcáreos, micáceos, fosilíferos, con laminación plano paralela, presentando nódulos ferruginosos paralelos a la estratificación; en la parte superior capas de lodolitas grises intercaladas con areniscas de grano fino. Se identifican rocas de formación La Luna (K2I) constituida por calizas grises en capas delgadas, fosilíferas, lodolitas calcáreas de color gris con grandes concreciones elipsoidales y discoidales, capas plano paralelas de chert, liditas silíceas y capas fosfáticas. Adicionalmente, se tienen algunos sectores con rocas de la formación Capacho (K1c) constituido por lodolitas de color gris oscuro, lodolitas calcáreas, calizas arenosas, areniscas cuarzosas de grano fino, calizas grises (packstone y wackstone) en capas delgadas (Fúquen et al., 2010). Del mismo modo, al ser característico de una zona montañosa y de alta pendiente, hay presencia de actividad erosiva y otros procesos fluviales.

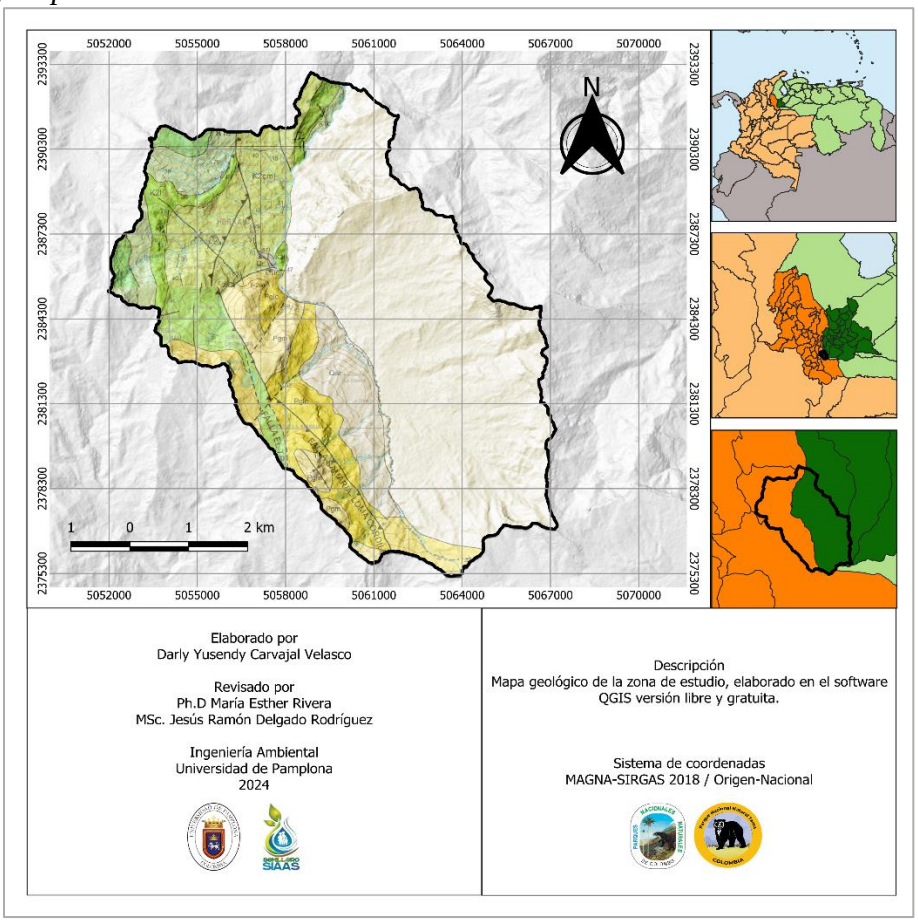
Por otro lado, en la plancha 111 (sector bajo de la cuenca) se encuentra referenciada la información de tres unidades litológicas de edades terciarias y unidades cuaternarias correspondientes a depósitos aluviales, esto se debe por la deposición del material arrastrado en la

zona superior. La formación Los Cuervos (Pglc), está conformada por lodolita gris a gris clara, escasamente micácea, carbonosa, con lentes de limolita y arenita gris, intercalaciones de arenita gris a gris oscuro, grado fino, ligeramente micácea y ferruginosa con abundantes fragmentos carbonosos y capas explotables de carbón preferentemente en las partes inferior y media. La formación Mirador (Pgm) contiene areniscas grises claro a blanco-amarillenta, grano medio a conglomerática; carbonosas, ferruginosas, deleznable, hacia la parte media, y lodolita gris a gris verdosa, carbonosa, en la parte superior arenita blanca de grano medio a conglomerática, feldespática en capas medianas. La formación Colon-Mito Juan (Kscmj) presenta lodolita gris oscuro, micácea, con restos carbonosos e icnofósiles, con nódulos areno-limosos y ferruginosos, con intercalaciones de arenita gris, grano fino a medio, con restos carbonosos y caliza gris, hacia la parte inferior, y capas de carbón en la parte superior. En algunos sectores se encuentran fragmentos significativos de aluvión (Qal) asociados a las riberas del río Táchira (Royero et al., 1999).

De igual manera, se observa la presencia de dos fallas conocidas: La falla Samaria-Loma Cordillera Santa Isabel, es una falla inversa y La falla El Trapiche considerada como falla inferida.

Figura 12

Mapa geológico parte alta de la cuenca del río Táchira.

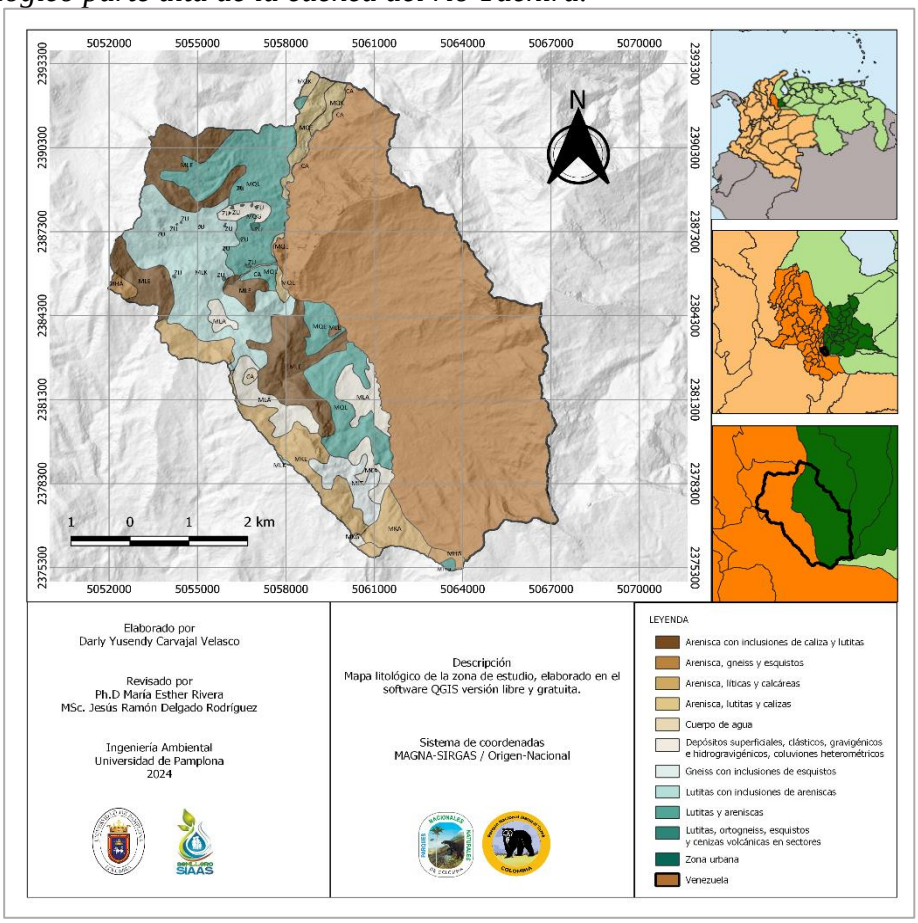


Fuente: Modificado de las planchas 99 – Villa del Rosario (2010) y 111 – Toledo (2013) por Carvajal, D. (2024).

En la figura 13 se observa el mapa litológico de la zona de estudio, sobresaliendo las arcillas y las arenas; las arcillas presentan lentes e inclusiones de arena, mientras que, en las arenas se pueden identificar fragmentos de caliza y lodolitas orgánicas. Lo anterior influye en la velocidad de infiltración en el suelo, por un lado, las texturas arenosas son comunes de velocidades de infiltración rápida, mientras que, las texturas arcillosas son pesadas y con poca capacidad de infiltración, originando así, encharcamientos en la cuenca (López et al., 2016).

Figura 13

Mapa litológico parte alta de la cuenca del río Táchira.



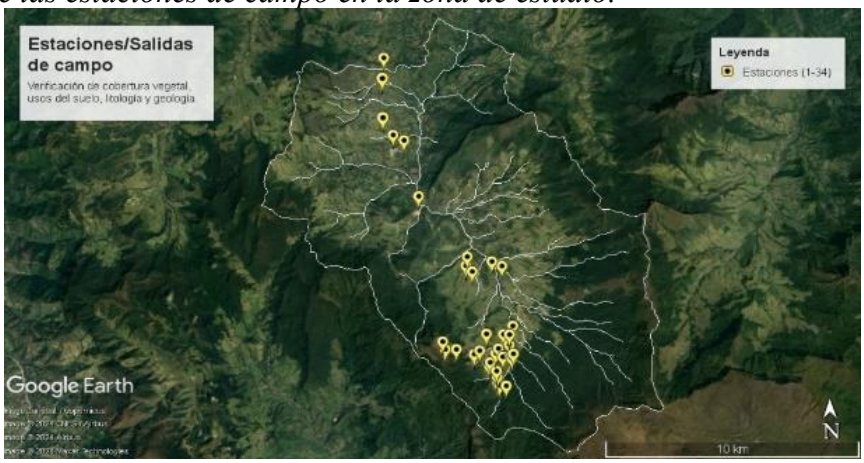
Fuente: Mapa modificado del mapa de suelos-Norte de Santander, IGAC por Carvajal, D. (2024).

Verificación de Cobertura Vegetal, Usos del Suelo, Litología y Geología en el Área de Estudio

En la figura 14 se muestra la localización de las 34 estaciones delimitadas (EST-n) en las salidas de campo para la verificación de variables como cobertura vegetal, usos del suelo, litología y geología en la zona de estudio.

Figura 14

Localización de las estaciones de campo en la zona de estudio.

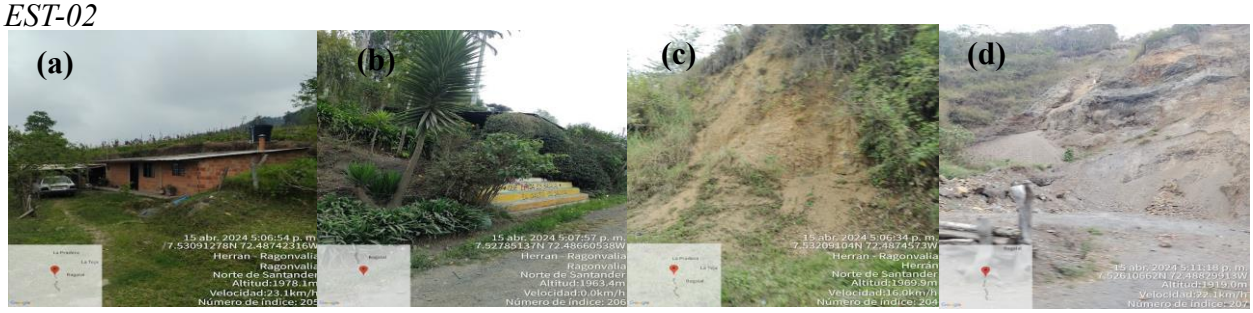


Fuente: Elaborado en Google Earth Pro por Carvajal, D. (2024).

De la figura 15 a la figura 30 se observan algunas imágenes destacadas de la cobertura vegetal, usos del suelo, litología y geología observados en las diferentes estaciones con su respectiva descripción.

Figura 15

EST-02



Nota. La estación se ubica en la vereda Bagalal, municipio de Herrán, con presencia de pastos y cultivos en las imágenes (a) y (b). De igual forma, hay evidencia de ciertos deslizamientos de tierra (c) y (d).

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 16

EST-04



Nota. Municipio de Herrán, parque principal, tejido urbano continuo.

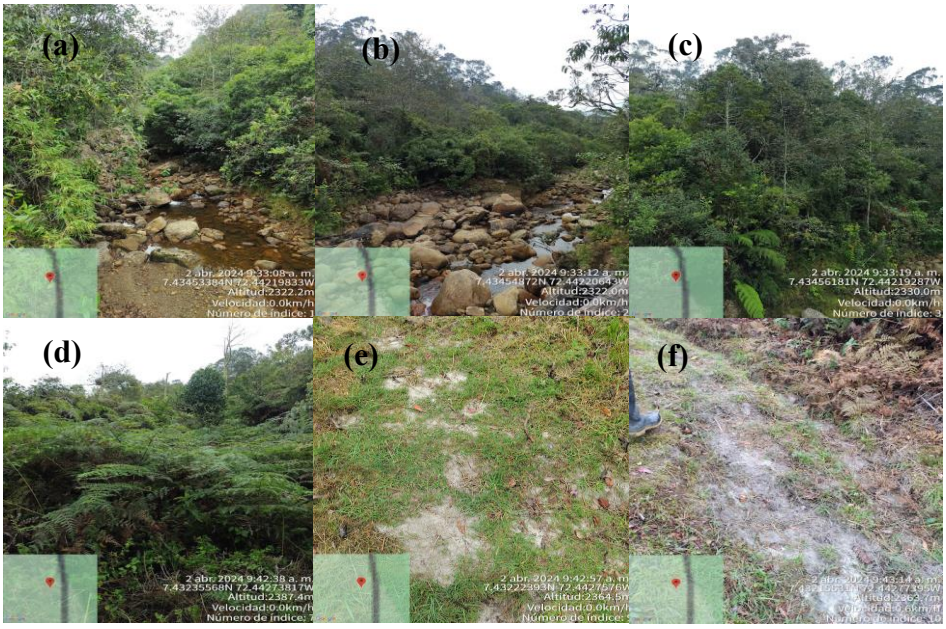
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 17
EST-06



Nota. Cobertura de pastos enmalezados y próximo a vegetación secundaria o en transición.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 18
EST-07



Nota. Río Táchira, PNN Tamá. Se evidencia la fuente hídrica de bajo nivel, con bloques removidos de 1 a 3 m de diámetro (a) y (b). Cobertura de bosque de galería y ripario, con presencia de helechos (c) y (d). En las imágenes (e) y (f) se observan calvas de erosión, con pérdida de vegetación al ser un camino.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 19
EST-09



Nota. Río Táchira, próximo a las cabañas en Orocué. Deposito pluvial-flavio torrencial, con presencia de areniscas y componente limoso, de igual forma se evidencian óxidos de hierro por el color ocre del agua. Algunos bloques contienen oquedades, indicando areniscas no puras, con presencia de plagioclasas, feldespatos o componentes finos. De igual modo, predominan bloques de 2 a 3 m de diámetro, siendo un indicativo de torrencialidad. La zona está próxima a una cobertura de bosque denso.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 20
EST-10



Nota. Ubicación en las cabañas de Orocué próximo a un predio privado. Se observa una cobertura de pastos limpios, pastos enmalezados y espacios naturales (a) (b) (c) (e), con suelo arcilloso en temporada seca que evidencia el paso de ganado (d). La imagen (f) da a conocer una morfología ondulada por posibles movimientos en masa antiguos.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 21
EST-11



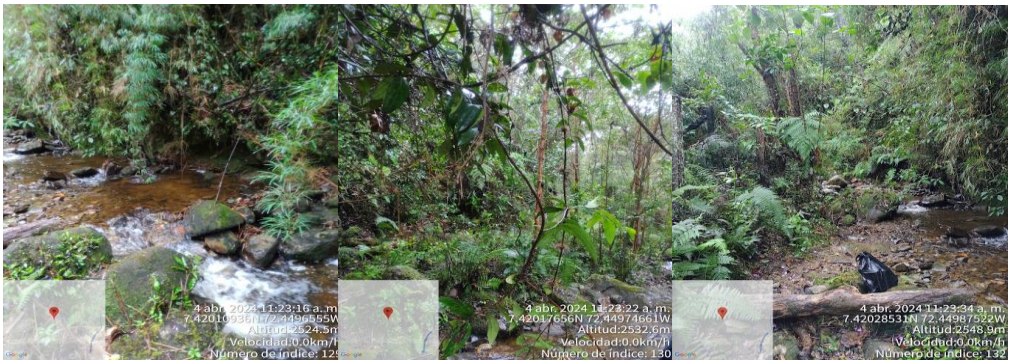
Nota. Confluencia entre el río Táchira y la quebrada La Pedrera. Bajo nivel de agua y rocas entre 2 a 5 m de diámetro aproximadamente (a). La zona abarca bosque con vegetación densa (b). Estratificación vertical por una posible falla (c).
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 22
EST-15



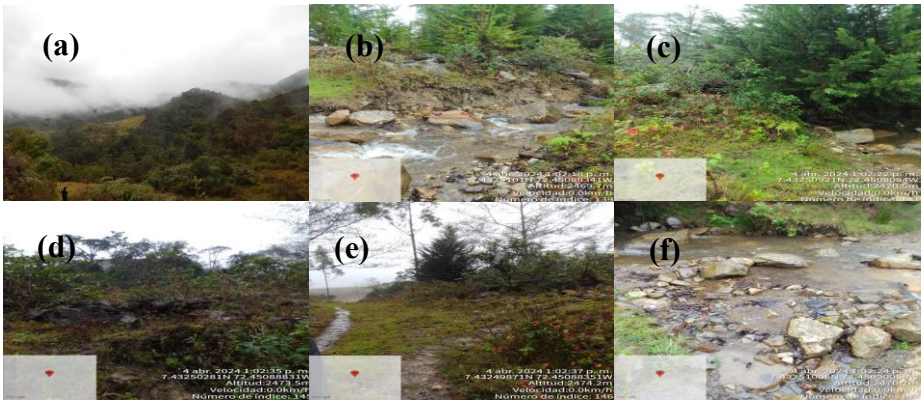
Nota. Quebrada Chiquita en el predio La Pedrera con bajo nivel de agua y bloques entre 1 a 3 m de diámetro aproximadamente, la coloración ocre del agua se puede originar por el arrastre de sedimentos limosos o arcillosos. Abarca la cobertura de vegetación secundaria o en transición.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 23
EST-19



Nota. Quebrada Orocué con abundante vegetación a su alrededor y flujo más alto, presencia de bloques pequeños entre 1 y 3 m de diámetro aproximadamente y helechos de diversas especies.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 24
EST-20



Nota. Quebrada La Colorada con presencia del evento de precipitación y bloques más grandes entre 2 a 5 m de diámetro aproximadamente, (b) (c) (d) (e): en la ribera se observan ciertas clases de pinos y demás vegetación arbustiva. La imagen (a) representa una cobertura de pastos y espacios naturales.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 25
EST-24



Nota. Bosque con predominio de árboles Siete Cueros y crecimientos de Palma de Cera, el cual ha sido intervenido periodos anteriores, siendo propio de una cobertura vegetal de vegetación secundaria o en transición.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 26
EST-25



Nota. Vegetación propia de sotobosque.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 27
EST-27



Nota. Páramo La Cabrera, vegetación de páramo con presencia de ciertos tipos de frailejón.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 28
EST-28



Nota. Cascada La Colorada. Vegetación secundaria o en transición.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 29
EST-30



Nota. Deslizamiento rotacional.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 30
EST-31



Nota. Vereda Siberia, Herrán. Mosaico de pastos y cultivos, presencia de ganado.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

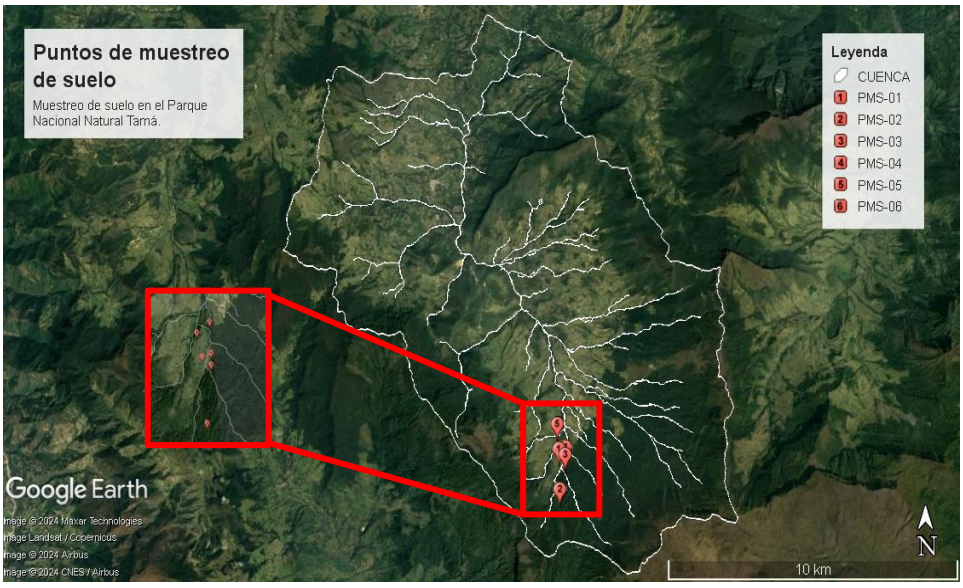
Caracterización Actual del Suelo y Verificación Litológica en la Zona de Estudio

Muestreo de Suelo

En la figura 31 se muestra la ubicación geográfica de los seis puntos de muestreo de suelo (PMS-n) con su respetiva enumeración, abarcando parte del PNN Tamá sector norte Orocué. De igual modo, la figura 32 pone en evidencia el trabajo de campo desarrollado.

Figura 31

Puntos de muestreo de suelo.



Fuente: Elaborado en Google Earth Pro por Carvajal, D. (2024).

Figura 32

Salida de campo para el muestreo de suelo.



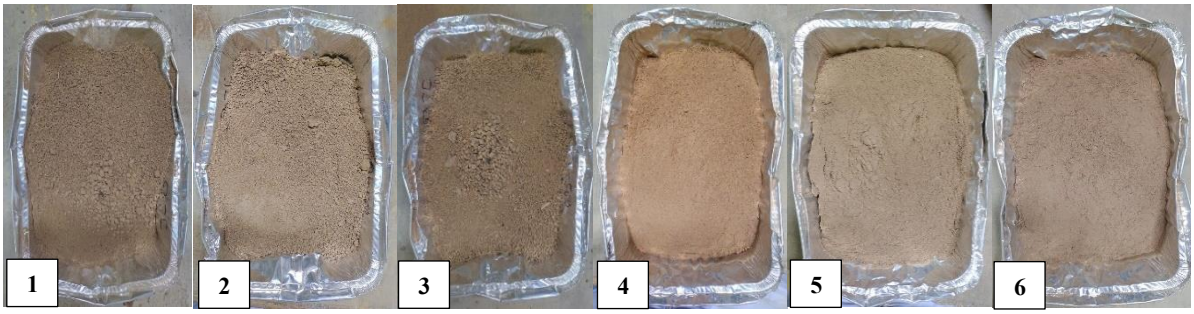
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Granulometría

La figura 33 ilustra las muestras recolectadas en la zona de estudio, destacando colores de café claro a marrón oscuro, con ciertas incrustaciones de rocas pequeñas y texturas similares entre ellas.

Figura 33

Muestras de suelo recolectadas.

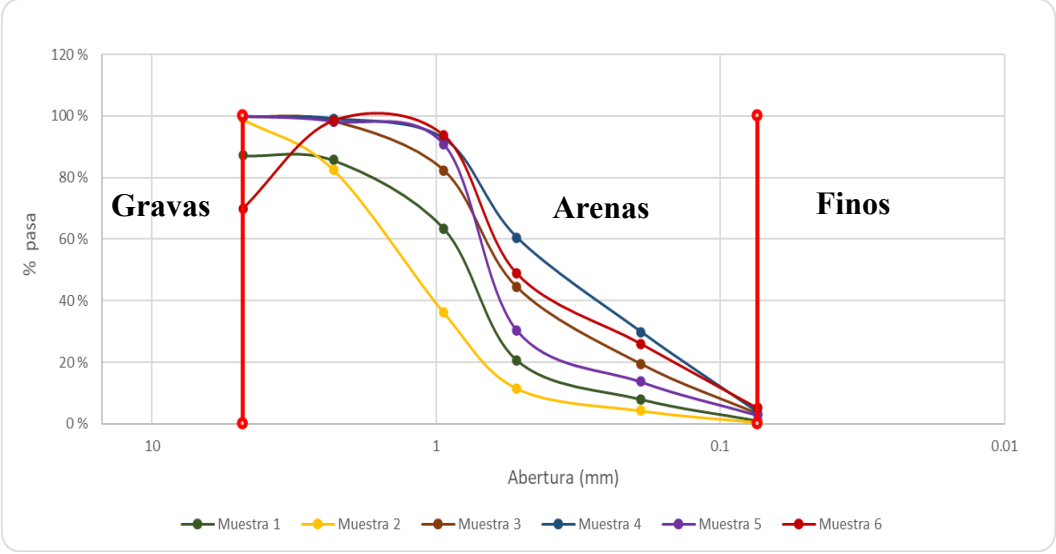


Fuente: Carvajal, D. (2024).

La curva granulométrica indica un predominio en la zona de las arenas para las seis muestras de suelo como se muestra en la figura 34. De igual modo, esto se confirma con base en la tabla 9, pues el porcentaje de arenas representa en todos los casos mayor al 80% de la totalidad de la muestra. Por lo tanto, los seis puntos de muestreo se caracterizan por tener suelos con capacidad reducida en cuanto a la retención de agua, resultando una filtración rápida de agua lluvia a través del suelo hacia la fuente hídrica (López et al., 2016), con posible susceptibilidad a la erosión, lo cual determina mayor arrastre de material en épocas lluviosas, afectando así, la calidad del agua. De igual modo, esta condición del suelo puede influir en el comportamiento vegetal a las riberas del río, debido a su capacidad mínima de aporte de nutrientes.

Figura 34

Curva granulométrica.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Tabla 9

Porcentaje de textura del suelo.

Textura	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
% Grava	12,81	0,95	0,15	0,35	0,00	0,79
% Arena	86,10	98,58	96,54	95,81	97,10	94,08
% Finos	1,09	0,47	3,31	3,84	2,90	5,13

Fuente: Carvajal, D. (2024).

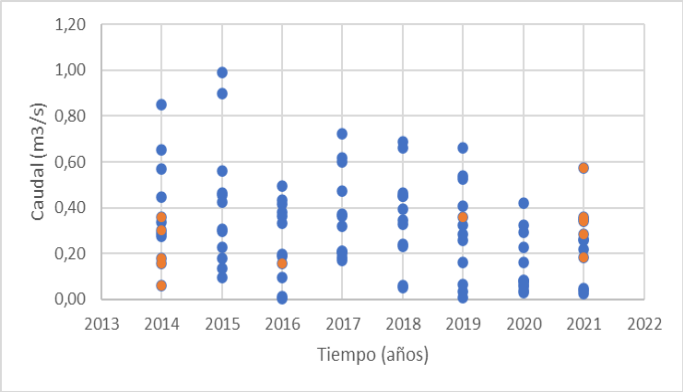
Análisis e Interpretación de las Variables Hidrometeorológicas Seleccionadas

Datos Faltantes

La serie temporal del caudal medio mensual en la estación OROCUE TAMA [16017070] presentó un 10% de datos faltantes con respecto a la totalidad de información, por ende, se aplicó el método aritmético de promedios mensuales multianuales para encontrar el dato faltante, cuyo resultado se representa en la figura 35, donde los datos de color naranja son aquellos imputados.

Figura 35

Imputación de datos estación OROCUE TAMA [16017070].



Fuente: Carvajal, D. (2024).

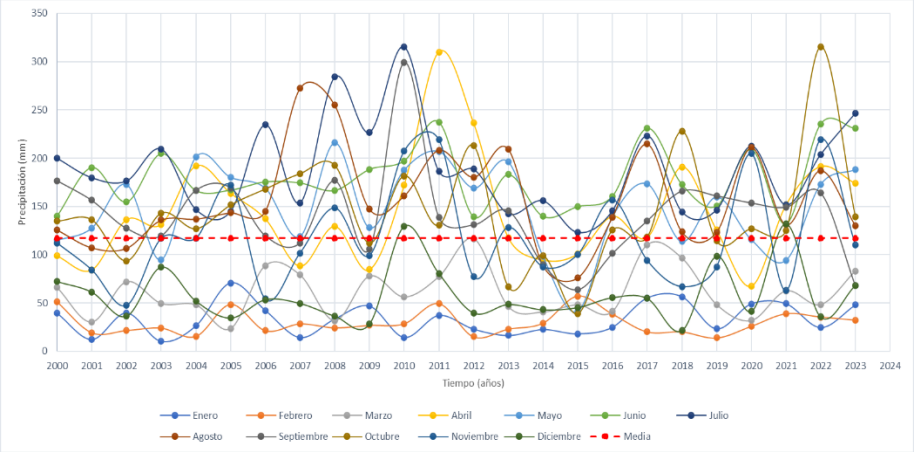
Análisis Descriptivo y Exploratorio de Datos

Precipitación Total Mensual

En la figura 36 se observa un comportamiento constante de precipitación a lo largo de la serie de tiempo seleccionada con base a la media, abarcando valores entre los 10 y los 250 mm, no obstante, con picos en el mes de agosto para el 2007, julio en el 2008 y 2010, septiembre para el 2010, abril en el 2011 y octubre en el 2022, indicando mayor cantidad de precipitación, lo cual concuerda con la presencia del fenómeno de La Niña en dichas fechas. De igual forma, los meses de enero, febrero y marzo indican para todos los años valores por debajo de la media, siendo periodos característicos de temporadas secas en la zona. En cuanto al fuerte evento del fenómeno de El Niño para el 2015, se señala que en la mayoría de los meses de dicho año se obtuvieron valores menores a la media, indicando menor cantidad de precipitación.

Figura 36

Variación temporal de precipitación total mensual.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

De la tabla 10 se muestra que la precipitación mensual en la zona de estudio durante el periodo evaluado presenta un valor promedio de 117,160 mm, con una tendencia a variar por debajo y por encima de la media en 67,762 mm y un registro de precipitación frecuente de 21,416 mm en los meses de febrero y diciembre del 2006 y 2018 respectivamente. En cuanto a la mediana, el 50% de los valores están por debajo de los 119,283 mm, siendo el máximo de 315,477 mm y el mínimo de 10,340 mm, representando un rango de variabilidad de 305,137 mm, obteniendo así, una variación relativa del 57,837 %.

Tabla 10

Estadística descriptiva precipitación total mensual.

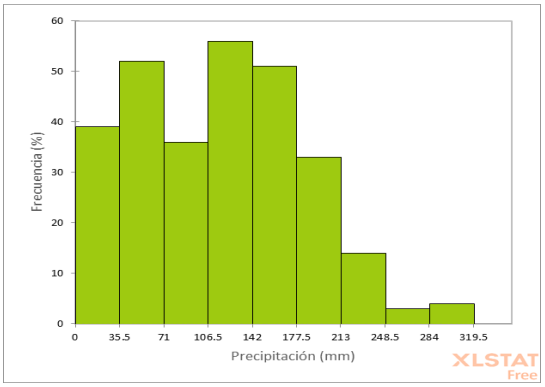
Estadístico	Valor
Media	117,160
Mediana	119,283
Moda	21,416
Desviación estándar	67,762
Coeficiente de variación	57,837
Rango	305,137
Mínimo	10,340
Máximo	315,477

Fuente: Carvajal, D. (2024).

A partir de la figura 37 se infiere que el histograma es asimétrico y picudo, con la concentración mayor de datos en las clases centrales entre 106,5 y 177,5 mm, generándose un pico de precipitación entre 106,5 y 142 mm con frecuencia cercana al 60%. De igual modo, los valores con menor frecuencia (< 10%) se ubican entre 248,5 y 319,5 mm, los cuales hacen referencia los datos máximos de dicha serie.

Figura 37

Histograma precipitación total mensual.

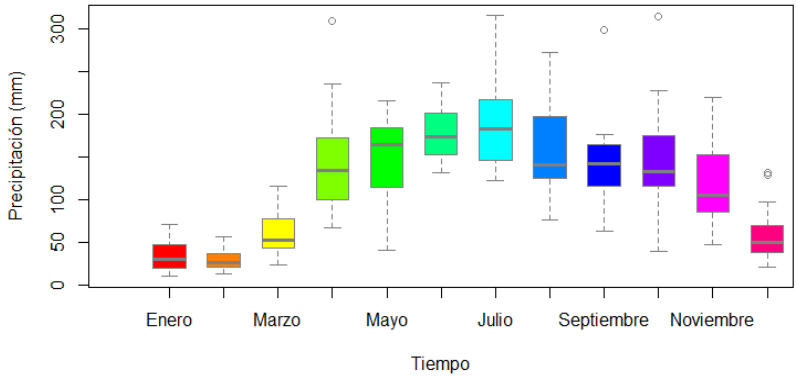


Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

La figura 38 representa la distribución de los datos mensuales multianuales agrupados en 12 subseries (enero-diciembre), donde se evidencia un régimen monomodal con un periodo lluvioso entre junio y julio principalmente, valores concentrados por debajo de los 250 mm, distribución simétrica en los meses de abril y julio, altas precipitaciones en los meses de junio, julio y agosto y mínima actividad en los meses enero, febrero, marzo y diciembre. Por otro lado, abril, septiembre, octubre y diciembre indican valores atípicos que se encuentran por fuera de los promedios, siendo un posible indicativo de eventos extremos.

Figura 38

Diagrama de cajas y bigotes precipitación total mensual.



Fuente: Modificado de RStudio por Carvajal, D. (2024).

La prueba de normalidad aplicada para la precipitación total mensual (Tabla 11) arroja un resultado (valor-p) menor al nivel de significancia de 0,05, de esta manera, rechazando la hipótesis nula Ho (los datos tienen una distribución normal) y aceptando la hipótesis alterna Ha (los datos no tienen una distribución normal) (Kisbye, 2010). Lo anterior se confirma con base en la figura 39, pues visualmente se observa cómo los datos no siguen una distribución normal, ya que varios se alejan de la línea de tendencia.

Tabla 11

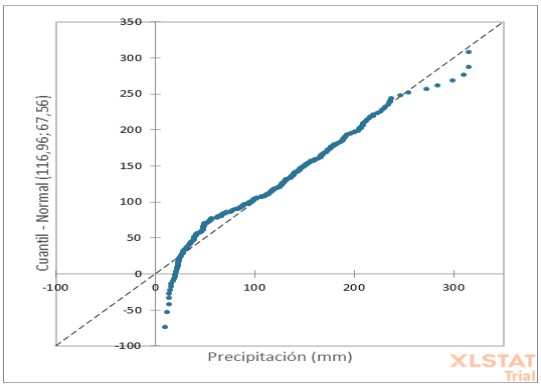
Prueba de normalidad precipitación total mensual.

Prueba de Anderson-Darling		
A²	**valor-p (bilateral)**	**Alfa**
2,426	<0,0001	0,05

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Figura 39

Gráfico Q-Q precipitación total mensual.

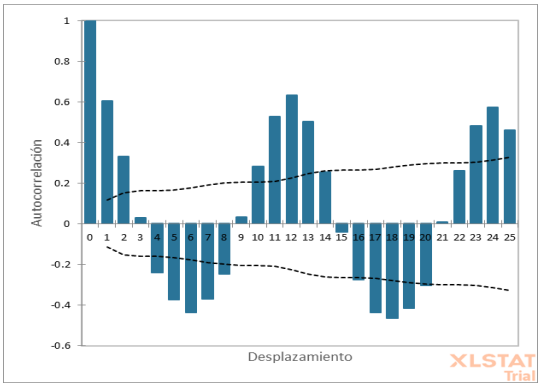


Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Según la figura 40, se observa un autocorrelograma simple lineal con un comportamiento cíclico (Martínez & Velásquez, 2011), reflejando el comportamiento estacional de la serie de tiempo (Paris et al., 2002). De igual modo, se demuestra que cada 12 meses en un ciclo anual, la precipitación presenta una variación.

Figura 40

Autocorrelograma precipitación total mensual.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Por otro lado, para confirmar la estacionariedad se aplicaron las pruebas Dickey-Fuller y Phillips-Perron (Tabla 12), las cuales obtienen valores-p menores al nivel de significancia de 0,05, rechazando la hipótesis nula Ho (hay una raíz unitaria para la serie) y aceptando la hipótesis alternativa Ha (no hay raíz unitaria para la serie, la serie es estacionaria) (Castellón, 2022).

Tabla 12

Prueba de raíz unitaria y estacionariedad precipitación total mensual.

Variable	Dickey-Fuller	Phillips-Perron
Valor	<0,0001	<0,0001

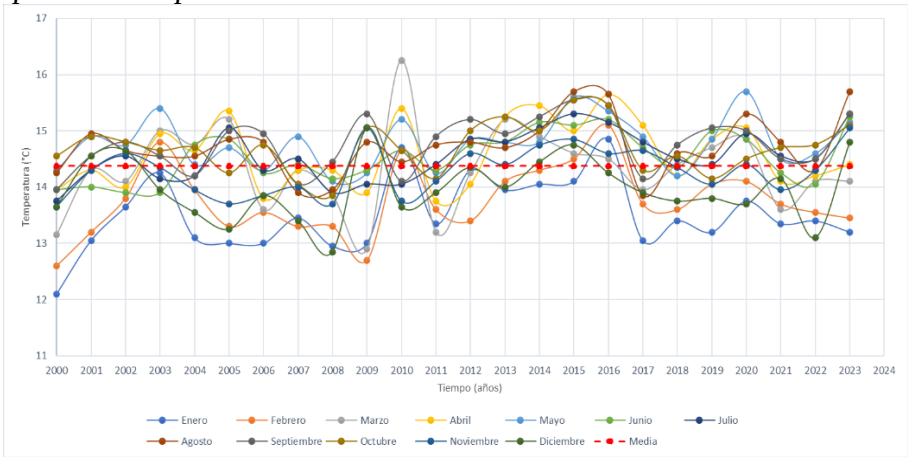
Fuente: Modificado de XLSTAT Carvajal, D. (2024).

Temperatura Media Mensual

En la figura 41 se observa un comportamiento constante de temperatura a lo largo de la serie de tiempo abarcando valores entre 13 °C y 16°C, no obstante, con picos en el mes de marzo para el 2010 indicando altas temperaturas y en el mes de enero para el 2000 indicando bajas temperaturas, lo cual concuerda con la presencia del fenómeno de El Niño y de La Niña respectivamente en dichos lapsos de tiempo. En cuanto al fuerte evento del fenómeno de El Niño para el 2015, se señala que en la mayoría de los meses de dicho año se obtuvieron valores mayores a la media, indicando aumento en las temperaturas.

Figura 41

Variación temporal de temperatura media mensual.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

De la tabla 13 se muestra que la temperatura media mensual en la zona de estudio durante el periodo evaluado presenta un valor promedio de 14,375 °C, con una desviación de aproximadamente 0,661 °C y un registro de temperatura frecuente de 14,300 °C. En cuanto a la mediana, el 50% de los valores están por debajo de 14,400 °C, siendo el valor máximo de 16,250 °C y el mínimo de 12,100 °C, representando un rango de variabilidad de 4,150 °C, obteniendo así, una variación relativa del 4,602 %.

Tabla 13

Estadística descriptiva temperatura media mensual.

Estadístico	Valor
Media	14,375
Mediana	14,400
Moda	14,300
Desviación estándar	0,661
Coeficiente de variación	4,602

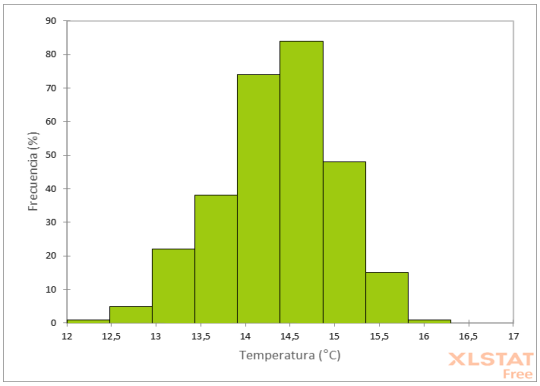
Rango	4,150
Mínimo	12,100
Máximo	16,250

Fuente: Carvajal, D. (2024).

A partir de la figura 42 se infiere que el histograma es simétrico con distribución normal, cuyos valores se centran alrededor de los 14,5 °C y frecuencia distribuida uniformemente, la concentración mayor de datos se da en las clases centrales entre 14 y 15 °C, donde se genera un pico de temperatura entre 14,5 y 15 °C con una frecuencia cercana al 85%, al igual que mínimas periodicidades para temperaturas alrededor de 12 o 16°C.

Figura 42

Histograma temperatura media mensual.

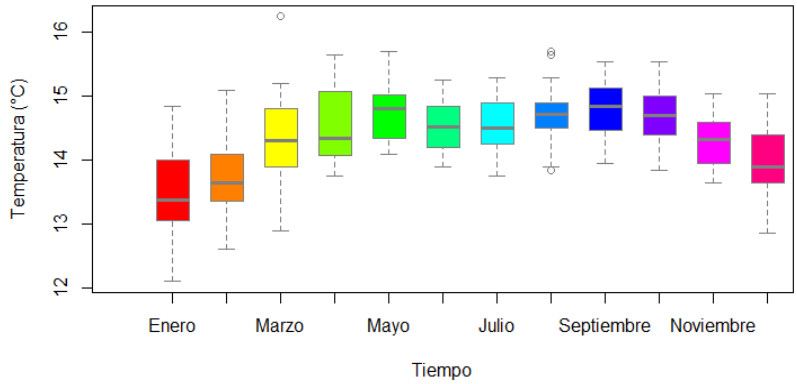


Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

La figura 43 representa la distribución de los datos mensuales multianuales agrupados en 12 subseries (enero-diciembre), donde se evidencia un régimen bimodal, señalando dos temporadas de temperaturas máximas a lo largo del año (abril-mayo) (septiembre-octubre), con valores concentrados por debajo de los 16 °C, distribución simétrica en los meses de junio y octubre y bajas temperaturas en enero, febrero y diciembre. Por otro lado, los meses de marzo y agosto indican valores atípicos que se encuentran por fuera de los promedios, siendo un posible indicativo de eventos extremos.

Figura 43

Diagrama de cajas y bigotes temperatura media mensual.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

La prueba de normalidad aplicada para la temperatura media mensual (Tabla 14) arroja un resultado (valor-p) menor al nivel de significancia de 0,05, de esta manera, rechazando la hipótesis nula Ho (los datos tienen una distribución normal) y aceptando la hipótesis alterna Ha (los datos no tienen una distribución normal) (Kisbye, 2010). Lo anterior se confirma con base en la figura 44, pues visualmente se observa cómo los datos no siguen una distribución normal, ya que en los extremos se alejan de la línea de tendencia.

Tabla 14

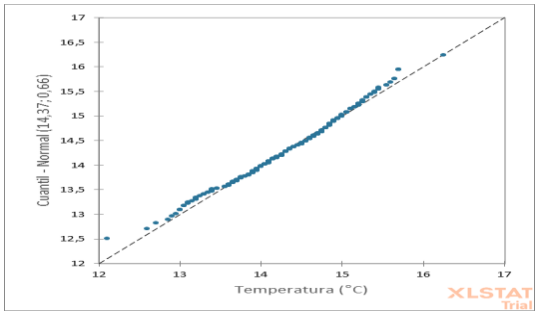
Prueba de normalidad temperatura media mensual.

Prueba de Anderson-Darling		
A^2	valor-p (bilateral)	alfa
0,818	0,034	0,05

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Figura 44

Gráfico Q-Q temperatura media mensual.

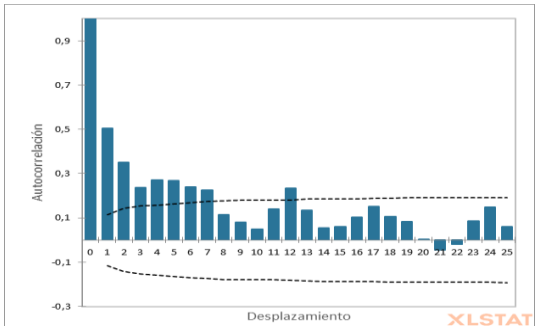


Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Según la figura 45, el autocorrelograma representa un decrecimiento rápido de los coeficientes de manera exponencial hasta acercarse al valor de cero, lo cual es típico de una serie de tiempo estacionaria al identificarla preliminarmente (Guevara, 2014). De igual forma, se evidencian las primeras autocorrelaciones estadísticamente significativas, pues sobresalen del límite superior de confianza.

Figura 45

Autocorrelograma temperatura media mensual.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Por otro lado, para confirmar dicha estacionariedad se aplicaron las pruebas Dickey-Fuller y Phillips-Perron (Tabla 15), las cuales obtienen valores-p menores al nivel de significancia de

0,05, donde se rechaza la hipótesis nula Ho (hay una raíz unitaria para la serie) y se acepta la hipótesis alternativa Ha (no hay raíz unitaria para la serie, la serie es estacionaria) (Castellón, 2022).

Tabla 15

Prueba de raíz unitaria y estacionariedad temperatura media mensual.

Variable	Dickey-Fuller	Phillips-Perron
Valor	<0,0001	<0,0001

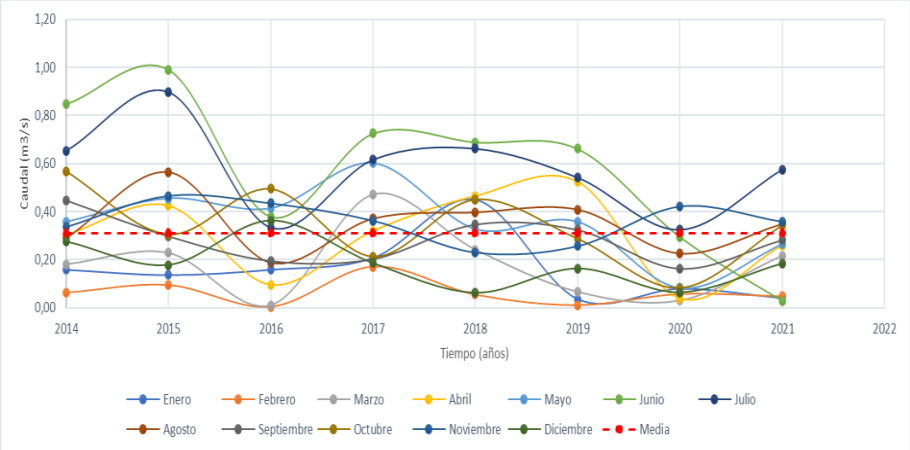
Fuente: Modificado de XLSTAT Carvajal, D. (2024).

Caudal Medio Mensual

En la figura 46 se observa un comportamiento de leve tendencia de caudal a lo largo de la serie de tiempo seleccionada, abarcando valores entre 0 m3/s y 0,7 m3/s principalmente, no obstante, con picos en los meses de junio y julio para el 2015, indicando un posible aumento de precipitación. De igual forma, los meses anteriormente nombrados para la mayoría de los años señalan valores muy altos con respecto a la media; al igual que los meses de febrero, marzo y diciembre muestran para la mayoría de años valores por debajo de la media, demostrando así, posible disminución de precipitación por temporadas secas.

Figura 46

Variación temporal de caudal medio mensual.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

La tabla 16 demuestra que el caudal medio mensual en la zona de estudio durante el periodo evaluado presenta un valor promedio de 0,311 m^3/s, con una tendencia a variar por debajo y por encima de la media en 0,210 m^3/s, sin registro de caudal frecuente. En cuanto a la mediana, el 50% de los valores están por debajo de 0,296 m^3/s, siendo el máximo de 0,991 m^3/s y el mínimo de 0,004 m^3/s, representando un rango de variabilidad de 0,987 m^3/s, obteniendo así, una variación relativa del 67,551 %.

Tabla 16

Estadística descriptiva caudal medio mensual.

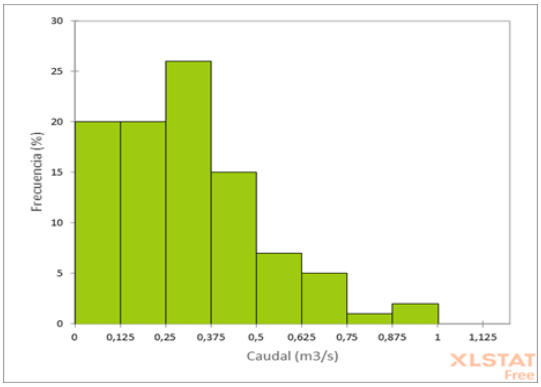
Estadístico	Valor
Media	0,311
Mediana	0,296
Moda	---
Desviación estándar	0,210
Coeficiente de variación	67,551
Rango	0,987
Mínimo	0,004
Máximo	0,991

Fuente: Carvajal, D. (2024).

A partir de la figura 47 se infiere un histograma asimétrico con distribución de sesgo positivo, donde la media se ubica a la izquierda y la frecuencia disminuye hacia la derecha, la concentración mayor de datos se da en las primeras clases siendo menor a 0,375 m^3/s, donde se genera un pico de caudal entre 0,25 y 0,375 m^3/s con frecuencia cercana al 26%. De igual modo, se observa frecuencia del 20% para caudales menores a 0,25 m^3/s.

Figura 47

Histograma caudal medio mensual.

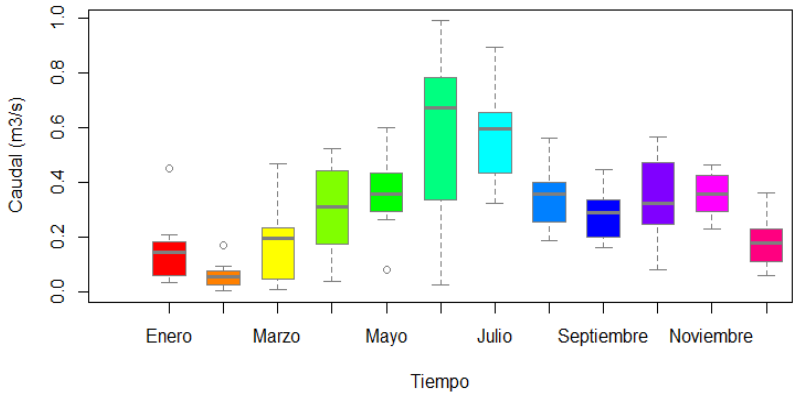


Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

La figura 48 representa la distribución de los datos mensuales multianuales agrupados en 12 subseries (enero-diciembre), donde se evidencia un régimen bimodal, con aumento de caudales en las temporadas (junio-julio) (septiembre-octubre) con datos concentrados por debajo de los 0,8 m^3/s, distribuidos simétricamente en los meses de abril y noviembre, con valores mínimos de caudal en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre. Por otro lado, enero, febrero y mayo indican valores atípicos que se encuentran por fuera de los promedios, siendo un posible indicativo de eventos extremos.

Figura 48

Diagrama de cajas y bigotes caudal medio mensual.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

La prueba de normalidad aplicada para el caudal medio mensual (Tabla 17) arroja un resultado (valor-p) menor al nivel de significancia de 0,05, de esta manera, rechazando la hipótesis nula Ho (los datos tienen una distribución normal) y aceptando la hipótesis alterna Ha (los datos no tienen una distribución normal) (Kisbye, 2010). Lo anterior se confirma con base en la figura 49, pues visualmente se observa cómo los datos no siguen una distribución normal, ya que varios se alejan de la línea de tendencia.

Tabla 17

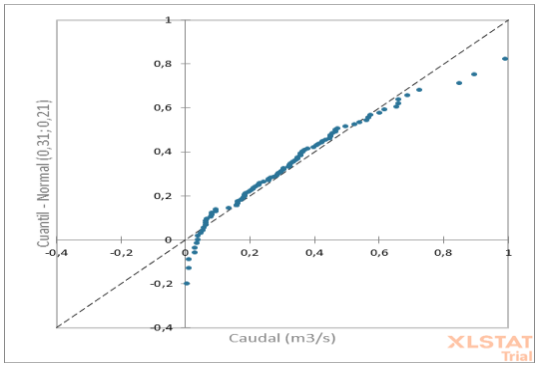
Prueba de normalidad caudal medio mensual.

Prueba de Anderson-Darling		
A^2	valor-p (bilateral)	alfa
0,954	0,015	0,05

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Figura 49

Gráfico Q-Q caudal medio mensual.



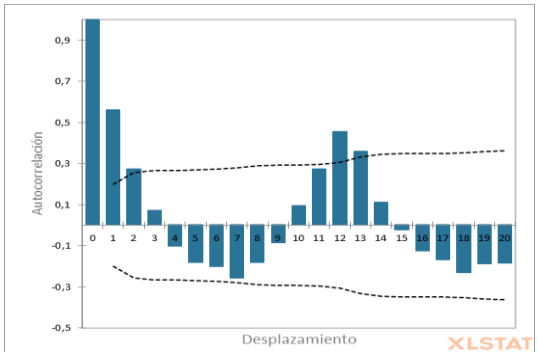
Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Según la figura 50, se observa un autocorrelograma simple lineal con un comportamiento cíclico (Martínez & Velásquez, 2011), reflejando el comportamiento estacional de la serie de tiempo (Paris et al., 2002). De igual forma, se evidencian las primeras autocorrelaciones

estadísticamente significativas, pues sobresalen del límite superior de confianza, y se demuestra que aproximadamente cada 12 meses en un ciclo anual, el caudal presenta una variación.

Figura 50

Autocorrelograma caudal medio mensual.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Por otro lado, para confirmar la estacionariedad se aplicaron las pruebas Dickey-Fuller y Phillips-Perron (Tabla 18), las cuales obtienen valores-p menores al nivel de significancia de 0,05, donde se rechaza la hipótesis nula Ho (hay una raíz unitaria para la serie) y se acepta la hipótesis alternativa Ha (no hay raíz unitaria para la serie, la serie es estacionaria) (Castellón, 2022).

Tabla 18

Prueba de raíz unitaria y estacionariedad caudal medio mensual.

Variable	Dickey-Fuller	Phillips-Perron
Valor	0,000	0,000

Fuente: Modificado de XLSTAT Carvajal, D. (2024).

Climograma

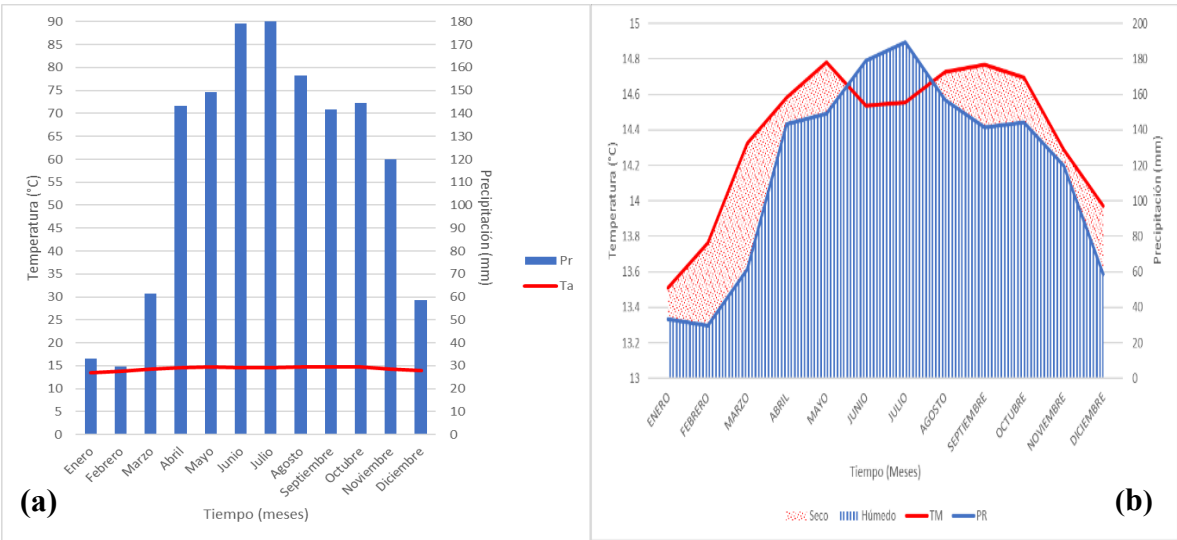
La figura 51 da a conocer los valores de temperatura media del aire en el eje izquierdo y precipitación total en el eje derecho para cada uno de los meses del año con datos promedio históricos multianuales del 2000 hasta el 2023 (Barrios, 2021), obteniendo así, diagramas con régimen monomodal para la variable de precipitación y bimodal para la de temperatura (Godoy, 2017).

El valor máximo de precipitación se generó en el mes de julio con 189,276 mm, y el valor mínimo en febrero con 29,538 mm. Por otro lado, con respecto a la temperatura, el valor más alto fue de 14,781 °C para el mes de mayo, y el mínimo en enero con 13,508 °C, donde la oscilación térmica es de 1,273 °C, característica de una oscilación baja y regular, común de un clima ecuatorial o tropical (Godoy, 2017). La precipitación total multianual presenta un valor promedio de 116,959 mm, superando dicha media los meses de abril hasta noviembre, y el de temperatura es 14,375 °C, superando mínimamente la media los meses de abril hasta octubre, a partir de lo anterior, se concluye que la zona de estudio pertenece a un clima templado mesotermal (da Silva et al., 2021). De igual modo, la precipitación total anual de 1403,503 mm pertenece a la clasificación muy abundante, característico de climas montañosos (Muñoz, 2003). Según la figura (b), se muestran temporadas relativamente secas en enero y febrero, con baja de precipitaciones

de agosto a septiembre, permaneciendo constante hasta octubre y de nuevo una disminución hasta diciembre.

Figura 51

a) *Climograma b) Diagrama ombroclimático.*



Fuente: Carvajal, D. (2024).

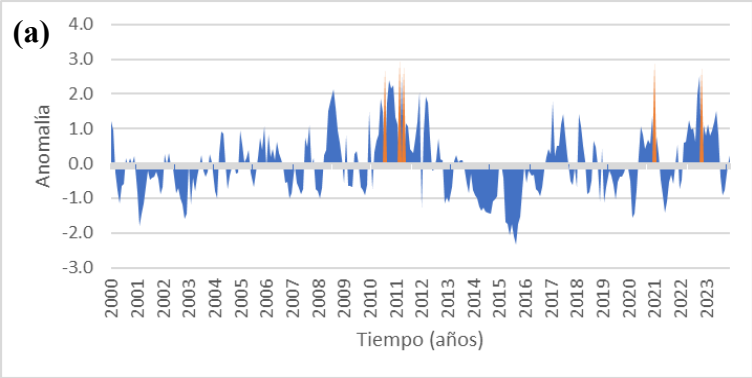
Anomalías

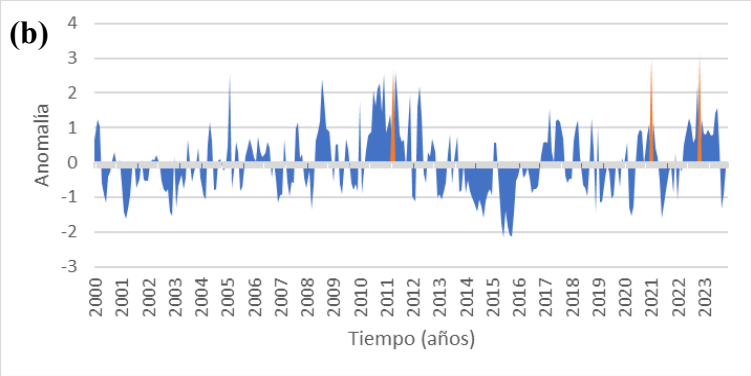
Precipitación Total Mensual

La figura 52 representa las anomalías con distribución trimensual y bimensual calculadas para el periodo del 2000 al 2023 en la serie de tiempo de precipitación, recalcando que para los años 2011, 2021 y 2022 se presentaron picos de periodos húmedos, los cuales fueron seleccionados según la tabla de valores críticos para la prueba de Grubbs (Grubbs & Beck, 1972), como datos mayores atípicos, superando el rango interpolado con un nivel de confianza del 95% de 2,6322, representando así, años en los que ha llovido por encima de lo normal o de lo esperado, de igual forma se destacan valores referentes a periodos secos en los años del 2014 al 2016.

Figura 52

Anomalías precipitación total mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual.





Fuente: Carvajal, D. (2024).

La prueba de normalidad aplicada para las anomalías de la precipitación total mensual (Tabla 19) arroja resultados (valor-p) menores al nivel de significancia de 0,05, de esta manera, rechazando la hipótesis nula Ho (los datos tienen una distribución normal) y aceptando la hipótesis alterna Ha (los datos no tienen una distribución normal) (Kisbye, 2010) para ambos casos. Lo anterior se confirma con base a la figura 53, pues visualmente se observa cómo los datos no siguen una distribución normal, ya que varios se alejan de la línea de tendencia.

Tabla 19

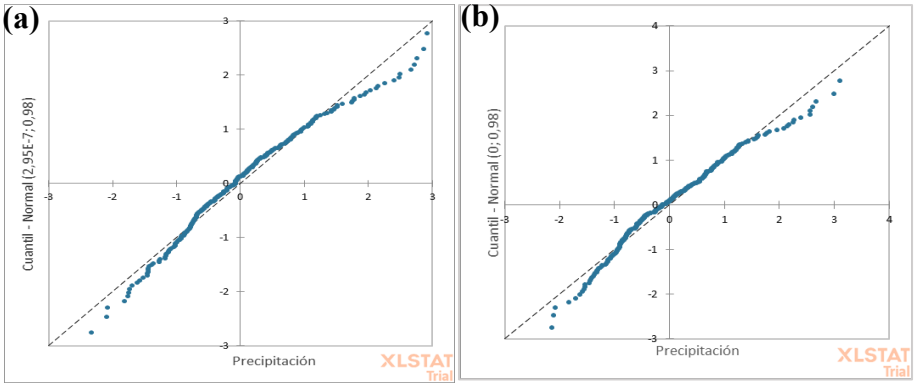
Prueba de normalidad anomalías precipitación total mensual.

Prueba de Anderson-Darling			
Distribución	**A^2**	**valor-p (bilateral)**	**alfa**
Trimensual	1,824	0,000	0,05
Bimensual	1,632	0,000	0,05

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Figura 53

Gráfico Q-Q anomalías precipitación total mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual.

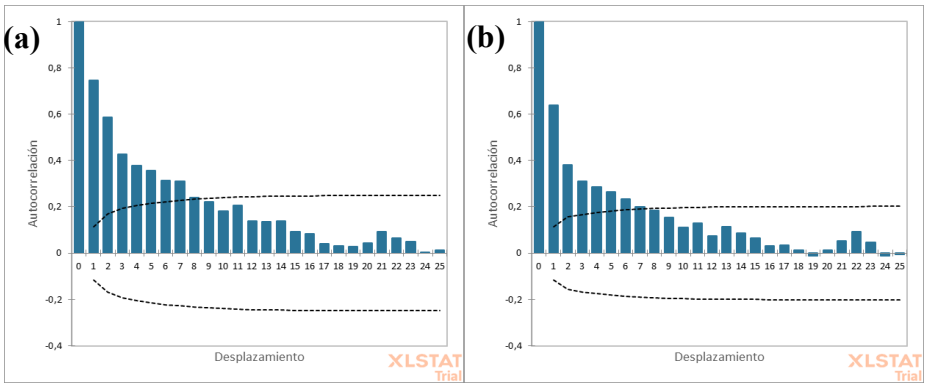


Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Según la figura 54, los autocorrelogramas representan un decrecimiento rápido de los coeficientes de manera exponencial hasta llegar al valor cero, lo cual es típico de una serie de tiempo estacionaria al identificarla preliminarmente (Guevara, 2014). De igual forma, se evidencian las primeras autocorrelaciones estadísticamente significativas, pues sobresalen del límite superior de confianza.

Figura 54

Autocorrelograma precipitación total mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Por otro lado, para confirmar dicha estacionariedad se aplicaron las pruebas Dickey-Fuller y Phillips-Perron (Tabla 20), las cuales obtienen valores-p menores al nivel de significancia de 0,05, donde se rechaza la hipótesis nula Ho (hay una raíz unitaria para la serie) y se acepta la hipótesis alternativa Ha (no hay raíz unitaria para la serie, la serie es estacionaria) (Castellón, 2022) para ambos casos.

Tabla 20

Prueba de raíz unitaria y estacionariedad precipitación total mensual.

Distribución	Dickey-Fuller	Phillips-Perron
Trimensual	0,031	<0,0001
Bimensual	0,006	<0,0001

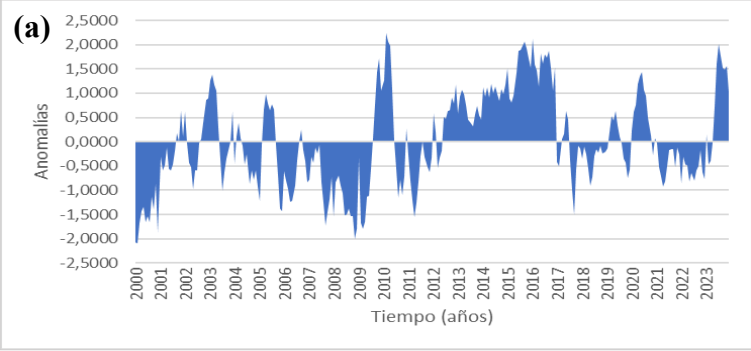
Fuente: Modificado de XLSTAT Carvajal, D. (2024).

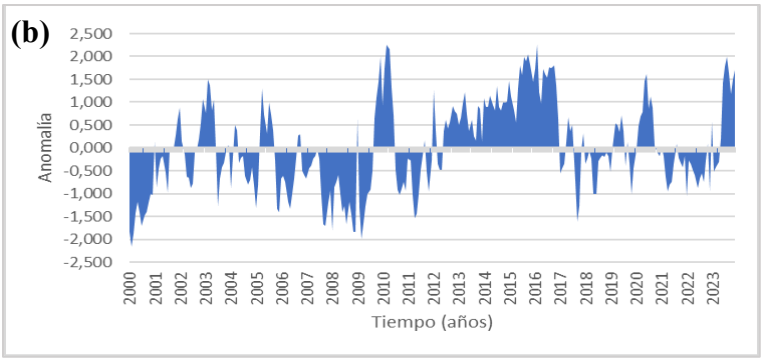
Temperatura Media Mensual

La figura 55 representa las anomalías con distribución trimensual y bimensual calculadas para el periodo del 2000 al 2023 en la serie de tiempo de temperatura, recalcando que del 2012 al 2016 se presentan picos de altas temperaturas, representando así, posibles periodos de sequía, con temperaturas por encima de lo normal o de lo esperado, de igual forma se destacan valores referentes a periodos de bajas temperaturas del 2007 al 2009.

Figura 55

Anomalías temperatura media mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual.





Fuente: Carvajal, D. (2024).

La prueba de normalidad aplicada para las anomalías de la temperatura media mensual (Tabla 21) arroja resultados (valor-p) menores al nivel de significancia de 0,05, de esta manera, rechazando la hipótesis nula Ho (los datos tienen una distribución normal) y aceptando la hipótesis alterna Ha (los datos no tienen una distribución normal) (Kisbye, 2010) para ambos casos. Lo anterior se confirma con base en la figura 56, pues visualmente se observa cómo los datos no siguen una distribución normal, ya que especialmente en los extremos hay alejamiento de la línea de tendencia.

Tabla 21

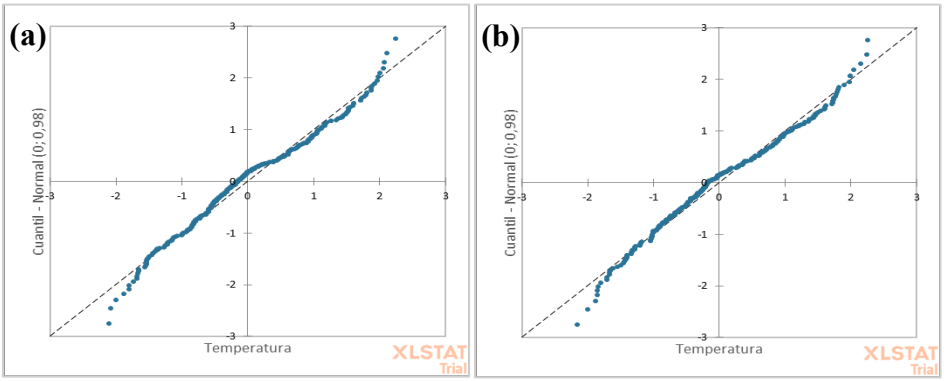
Prueba de normalidad anomalías temperatura media mensual.

Prueba de Anderson-Darling			
Distribución	**A^2**	**valor-p (bilateral)**	**alfa**
Trimensual	1,649	0,000	0,05
Bimensual	1,336	0,002	0,05

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Figura 56

Gráfico Q-Q anomalías temperatura media mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual.



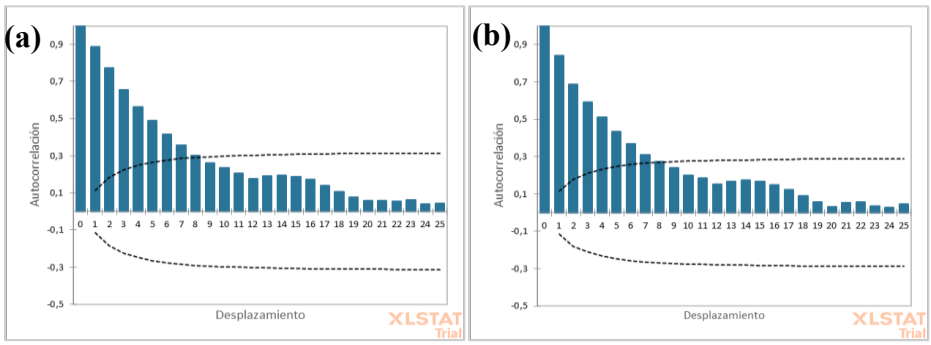
Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Según la figura 57, los autocorrelogramas representan un decrecimiento rápido de los coeficientes de manera exponencial hasta llegar al valor de cero, lo cual es típico de una serie de tiempo estacionaria al identificarla preliminarmente (Guevara, 2014). De igual forma, se

evidencian las primeras autocorrelaciones estadísticamente significativas, pues sobresalen del límite superior de confianza.

Figura 57

Autocorrelograma temperatura media mensual. a) Distribución trimensual y b) Distribución bimensual.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Por otro lado, para confirmar dicha estacionariedad se aplicaron las pruebas Dickey-Fuller y Phillips-Perron (Tabla 22), las cuales obtienen valores-p menores al nivel de significancia de 0,05, donde se rechaza la hipótesis nula Ho (hay una raíz unitaria para la serie) y se acepta la hipótesis alternativa Ha (no hay raíz unitaria para la serie, la serie es estacionaria) (Castellón, 2022) para ambos casos.

Tabla 22

Prueba de raíz unitaria y estacionariedad temperatura media mensual.

Distribución	Dickey-Fuller	Phillips-Perron
Trimensual	0,011	0,002
Bimensual	0,011	0,000

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Análisis Correlacional

La tabla 23 representa la matriz de correlaciones con sus coeficientes correspondientes para cada variable, precipitación (PR), temperatura (TM), Índice Oceánico de El Niño (ONI) e Índice ENSO multivariado Versión 2 (MEI.v2). Se utilizaron los datos de anomalías para las variables meteorológicas y el coeficiente de correlación Spearman para todas las series de tiempo, debido a su distribución de normalidad. En todas las correlaciones se obtuvieron valores $p < 0,05$, de este modo, rechazando la hipótesis nula ($rs = 0$, no existe relación) y aceptando la hipótesis alternativa ($rs != 0$, sí existe relación).

En cuanto a las variables de precipitación y temperatura, el coeficiente de correlación arrojó un valor significativo de -0,369, característico de una correlación negativa media (Hernández & Mendoza, 2023), con una lenta tendencia creciente de inversa proporcionalidad entre las variables, ya que al aumentar (disminuir) la temperatura, suele presentarse una disminución (aumento) de la precipitación, existiendo una dependencia de sensibilidad de la precipitación frente a la variación de temperatura (Correa., et al 2021).

La precipitación en relación con los índices macroclimáticos ONI y MEI.v2 arrojó resultados negativos de -0,396 y -0,435 respectivamente, indicando la inversa proporcionalidad entre las variables, pues al aumentar o disminuir la temperatura superficial del mar, suele presentarse una disminución o aumento de la precipitación (Ramírez et al., 2018), enfatizando una correlación negativa media en ambos casos (Hernández & Mendoza, 2023). De esta manera, se infiere, que, en las fases cálidas de los índices, la precipitación suele disminuir, mientras que, en las fases frías, la precipitación aumenta. La relación existente suele ser no tan fuerte, con dispersión media de los datos en la regresión lineal indicando media causalidad de los índices macroclimáticos sobre la variabilidad en el parámetro evaluado, sin embargo, indicando una relación con eventos de variabilidad climática en la zona (Flórez & Torres, 2022).

A partir de la correlación entre la serie de temperatura y las variables macroclimáticas del ENOS se obtuvieron valores positivos, indicando así, un comportamiento directamente proporcional entre ellas, pues el incremento o la disminución de una genera el mismo efecto en la otra (Fajardo & Franco, 2004). Por ende, la temperatura en evaluación con el ONI y con el MEI.v2 presentaron una correlación positiva considerable (Hernández & Mendoza, 2023), concluyendo de esta manera, la presencia de variabilidad climática en la zona, pues al aumento (Niña) o disminución (Niño) de los índices del ENOS, la temperatura toma comportamientos de similares a muy cercanos.

Tabla 23

Matriz de correlaciones anomalías.

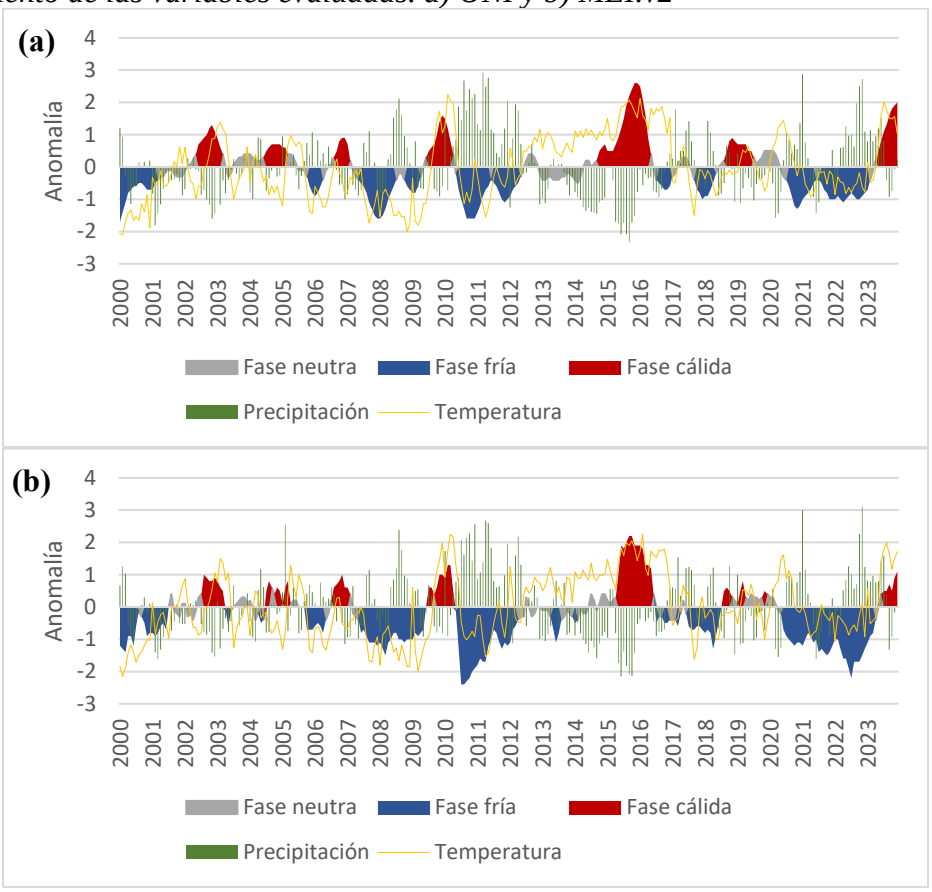
Variables	PR	TM	ONI	MEI.v2
PR	1	-0,369	-0,396	-0,435
TM	-0,369	1	0,526	0,525
ONI	-0,396	0,526	1	0,922
MEI.v2	-0,435	0,525	0,922	1

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

La figura 58 da a conocer que las fases cálidas y frías del ENOS inciden directamente en el comportamiento de la temperatura y la precipitación en la mayoría de los periodos de tiempo establecidos. Por un lado, se demuestran máximas temperaturas en las fases cálidas y mínimas temperaturas en las fases frías; comportamiento contrario respecto a la precipitación, pues en este caso, se observa una tendencia inversamente proporcional, a mayor temperatura y presencia de fases cálidas, menor grado de precipitación se genera, resaltando el lapso de tiempo 2015-2016, fechas características de una incidencia severa en cuanto al fenómeno de El Niño en la región. De igual forma, la fase fría y las temperaturas bajas coinciden con un aumento paulatino en las precipitaciones, especialmente en los años 2011-2012, característicos de una incidencia mayor con respecto al fenómeno de La Niña. En el caso de presencia de valores atípicos al comportamiento nombrado anteriormente, como la presencia de lluvias en la fase cálida, existe la posibilidad de su origen debido a otros factores climáticos influyentes en la zona, relacionados con frentes fríos o brisas que vienen, por la onda de Madden Julian (MJO), y demás fenómenos meteorológicos que convergen en el territorio (Peña, 2024).

Figura 58

Comportamiento de las variables evaluadas. a) ONI y b) MEI.v2



Fuente: Carvajal, D. (2024).

La tabla 24 representa la matriz de correlaciones con sus coeficientes correspondientes para cada variable, precipitación (PR), temperatura máxima (TMX) y caudal (Q). Se utilizaron los datos originales y el coeficiente de correlación Spearman para todas las series de tiempo, debido a su distribución de normalidad. El caudal se correlacionó directamente con los datos de precipitación y temperatura máxima, pues al incidir el fenómeno del ENOS en dichas variables, influye en el comportamiento de la fuente hídrica. En todas las correlaciones se obtuvieron valores $p < 0,05$, de este modo, rechazando la hipótesis nula (rs = 0, no existe relación) y aceptando la hipótesis alternativa (rs != 0, sí existe relación).

El coeficiente de correlación para la precipitación y el caudal obtuvo un valor de 0,610, clasificado como una correlación positiva considerable (Hernández & Mendoza, 2023), concluyendo que al aumentar (disminuir) la precipitación se da un incremento (disminución) en el nivel del caudal de la fuente hídrica. De igual forma, para la temperatura y el caudal se obtuvo un valor de correlación de -0,148, estimado como una correlación negativa media (Hernández & Mendoza, 2023), dando a conocer una leve dependencia entre las variables, pues al incrementar (disminuir) la temperatura, suele disminuir (incrementar) el caudal del río. Sin embargo, las dos variables nombradas anteriormente no llegan a ser completamente significativas para cambiar el régimen del caudal (Romero & González, 2016), de esta manera, deduciendo la posible influencia

de otros factores como el régimen fluvial, la vegetación, el tipo de suelo, la pendiente, el tipo de relieve, los usos del recurso por parte de la comunidad, entre otros.

Tabla 24

Matriz de correlaciones originales.

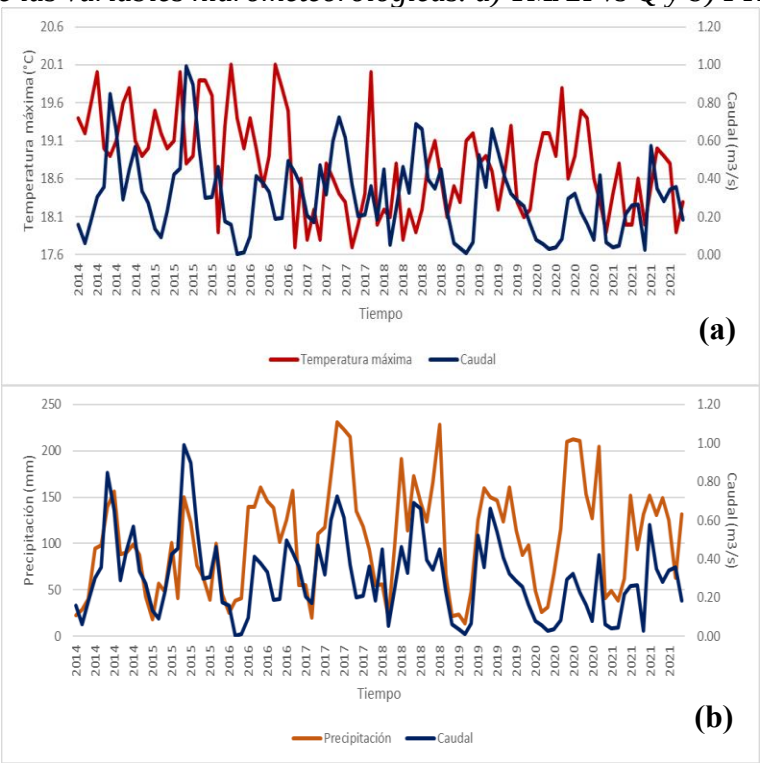
Variables	Q
PR	0,610
TMX	-0,148
Q	1

Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

La figura 59 da a conocer el comportamiento temporal de las variables meteorológicas en cuanto a la incidencia en el recurso hídrico, evaluando en este caso los valores de caudal. Por un lado, se evidencia ciertos picos de temperaturas máximas y una disminución de caudal en la cuenca, sin embargo, con atípicos o poco relacionados, indicando que la temperatura no influye por completo en el comportamiento hídrico de la zona. Por otro lado, en cuanto a la precipitación, se observa una relación más estrecha entre las variables, pues en la mayoría de los años, a medida que aumentaron o disminuyeron las épocas de lluvia, el caudal también tomó un estado similar. Por ende, se puede concluir que, debido a la incidencia de los fenómenos macroclimáticos en las variables meteorológicas, se genera un cambio indirecto en el estado hídrico de la cuenca, en especial a causa de la precipitación. No obstante, debido a la cantidad mínima de datos de caudal, el análisis de la serie de tiempo no pudo identificar patrones y tendencias con precisión.

Figura 59

Comportamiento de las variables hidrometeorológicas. a) TMAX vs Q y b) PR vs Q.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Correlación Cruzada

La correlación cruzada representada en la tabla 25 permitió establecer una relación más estrecha entre las variables meteorológicas y los índices macroclimáticos, utilizando un nivel de significancia de 0,05 y 12 desplazamientos (lags) representados como meses. En todas las correlaciones se obtuvieron valores p < 0,05, de este modo, rechazando la hipótesis nula (rs = 0, no existe relación) y aceptando la hipótesis alternativa (rs != 0, sí existe relación).

En cuanto a la precipitación en relación con el ONI y el MEI.v2 (Figura 60 y 61 (a)), se obtuvieron como resultados correlaciones negativas medias con mayor significancia en el desplazamiento 0, esto da a conocer la ausencia de retardo, es decir, a medida que varían las fases en los índices macroclimáticos, la precipitación también lo hace al mismo tiempo. Por otro lado, la temperatura con respecto al ONI y el MEI.v2 (Figura 60 y 61 (b)) arrojaron valores típicos de una correlación positiva considerable, dando a entender, la presencia de retardos, con mayor significancia en el desplazamiento 2 para el ONI y en el desplazamiento 1 para el MEI.v2, lo cual infiere la variación de la temperatura dos meses y un mes después de que se generen los eventos relacionados con los índices macroclimáticos respectivamente.

Tabla 25

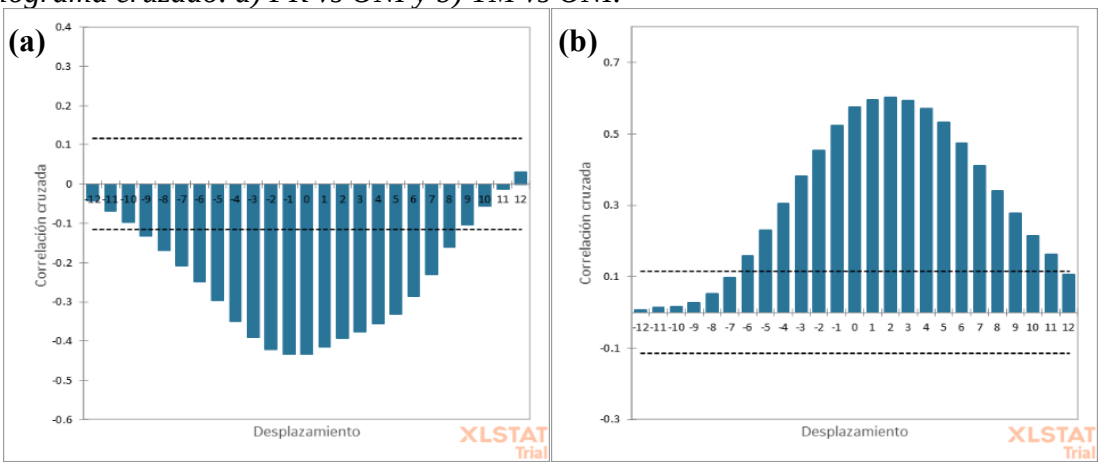
Correlaciones cruzadas variables meteorológicas e índices macroclimáticos.

	Desplazamientos	Correlación cruzada
PR vs ONI	0	-0,433
TM vs ONI	2	0,602
PR vs MEI.v2	0	-0,491
TM vs MEI.v2	1	0,599

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 60

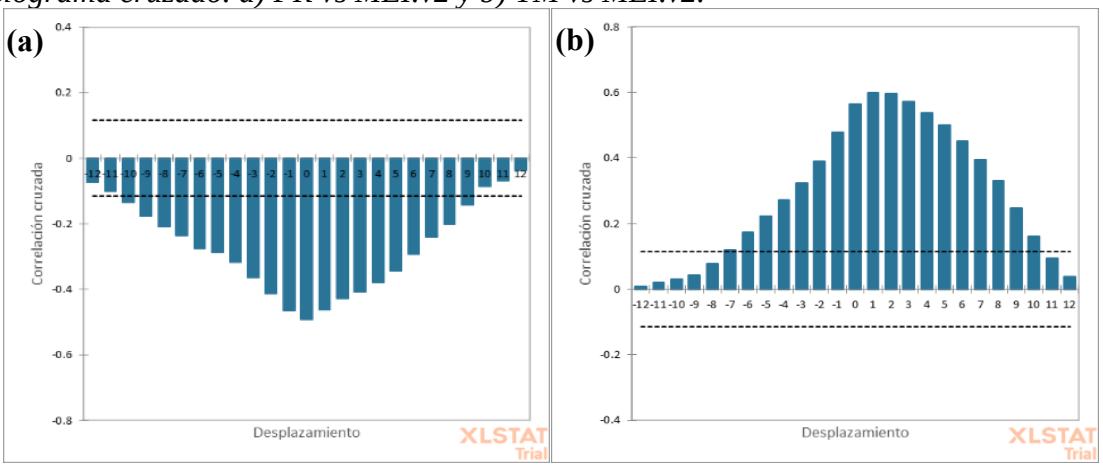
Correlograma cruzado. a) PR vs ONI y b) TM vs ONI.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

Figura 61

Correlograma cruzado. a) PR vs MEI.v2 y b) TM vs MEI.v2.



Fuente: Modificado de XLSTAT por Carvajal, D. (2024).

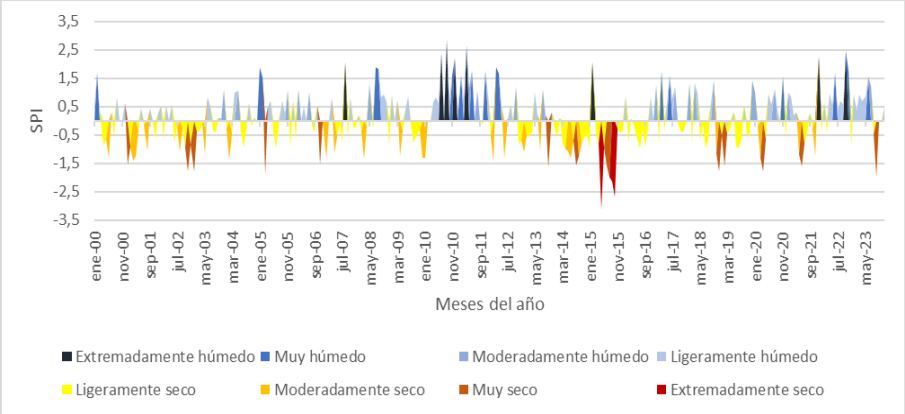
Índices de Sequía

Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

A partir de los índices obtenidos y la clasificación de estos (Figura 62) (Tabla 26) con base en (Cacciamani et al., 2007), se concluye que en la zona de estudio hay variabilidad de sequías, que van desde lapsos de tiempo extremadamente húmedos a extremadamente secos, predominando así, los periodos ligeramente secos con un 39,930% de la serie histórica evaluada, seguido de periodos ligeramente húmedos con representación del 30,208% de la totalidad de esta. De igual forma, en agosto del 2007, septiembre y diciembre del 2010, abril del 2011, febrero del 2015, diciembre del 2021 y octubre del 2022 se generaron periodos extremadamente húmedos con un porcentaje del 2,778%, fechas que concuerdan con la fase fría de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), indicando que, aunque se evaluó en gran medida el índice durante un período de tiempo con episodios ligeramente secos recurrentes, estos eventos extremos sugieren un aumento en la cantidad de precipitación, lo que resulta en un crecimiento significativo de la humedad (Arujo & Rivera, 2021). Por otro lado, para mayo, septiembre y octubre del 2015 con un porcentaje del 1,042% se presentaron periodos de sequía extrema, lo cual coincide con los eventos llevados a cabo por la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), indicando una posible disminución de precipitación y, por ende, disminución de humedad y niveles de caudal en la cuenca, junto con afectaciones considerables en las zonas agrícolas y/o protegidas (Arujo & Rivera, 2021). Además, se observan periodos húmedos continuos del 2010 al 2011, lo cual es simultaneo con los años clasificados como La Niña con alta incidencia en la región Andina como lo indica Euscátegui & Hurtado (2011) y periodos secos para los años (2002-2003) y (2009-2010), con influencia del fenómeno de El Niño de intensidad moderada (Ceballos & Poveda, 2005) (Loaiza et al.,2015).

Figura 62

Índice de sequía estandarizado SPI



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Tabla 26

Frecuencia de ocurrencia SPI.

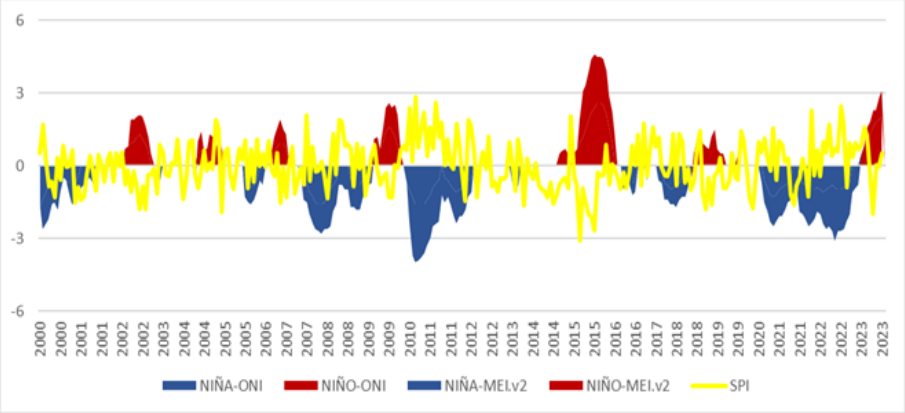
Magnitud	ExH	MuH	MoH	LigH	LigS	ModS	MuS	ExS	Total
N° eventos	8	17	20	87	115	24	14	3	288
Porcentaje	2,778	5,903	6,944	30,208	39,930	8,333	4,861	1,042	100

Fuente: Carvajal, D. (2024).

La figura 63 da a conocer el comportamiento de los índices de sequía estandarizados obtenidos anteriormente con respecto a las fases cálidas y frías de los índices macroclimáticos ONI y MEI.v2 en la serie de tiempo establecida. Demostrando que, en la mayoría de los periodos, cuando se presentaron eventos cálidos del ENOS (El Niño) se puede ver la intensificación de las sequías, en especial para el caso del 2015, temporada con la mayor incidencia de este fenómeno en la región, demostrando así, una posible escasez de agua en la zona de estudio debido a la disminución de precipitaciones y aumento de la temperatura. No obstante, en el caso de los eventos fríos del ENOS (La Niña) se observan periodos húmedos, especialmente para el año 2010, característico de un evento medio de La Niña, con posible aumento de precipitación, disminución de temperatura, y, por ende, un aumento en los caudales de la cuenca.

Figura 63

Valores de SPI vs ONI y MEI.v2.



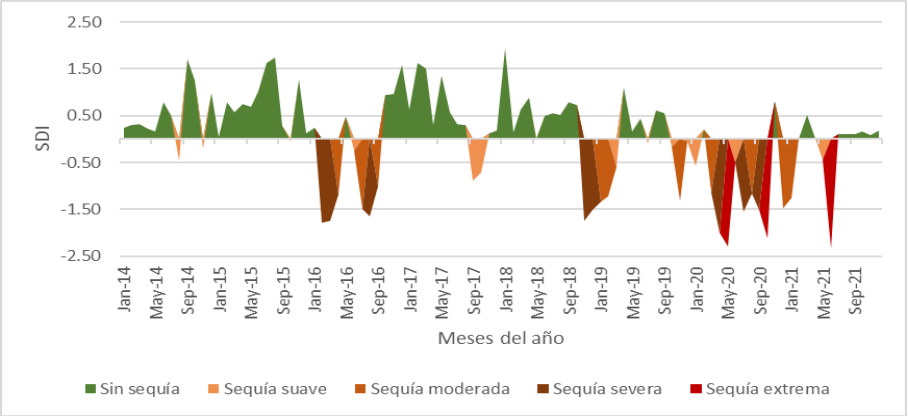
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Índice de Sequía de Caudales (SDI)

A partir de los índices obtenidos y la clasificación de estos (Figura 64) (Tabla 27) con base en (Díaz et al., 2019), se concluye que en la zona de estudio hay poca variabilidad de sequías en el caudal de la fuente hídrica, con predominio del 63,542% en los periodos sin sequía, resaltando su continuidad del 2014 hasta inicios del 2016, seguido de periodos de sequía suave con representación del 14,583% con respecto al total. De igual forma, para mayo y octubre del 2020 y junio del 2021, se generaron periodos con sequías extremas representando un porcentaje mínimo de 3,125%, indicando que, aunque se evaluó en gran medida el índice durante un período de tiempo con episodios sin sequía recurrentes, estos eventos extremos sugieren una disminución considerable en el cauce del río. Además, se observan periodos de sequía continuos en el 2016, lo cual puede relacionarse con la fase cálida de fenómeno ENOS, El Niño ocurrida en el 2016 (González & Carvajal, 2020), al igual que en noviembre y diciembre del 2018, con presencia de sequía por parte del SDI y el SPI, y un evento de sequía continua del 2020 al 2021. De igual modo, es relevante tener en cuenta que existe un desfase natural entre la precipitación y el caudal, por ende, no necesariamente deben estar relacionados los índices evaluados (Díaz, 2019). Además, se debe considerar que, durante los periodos de sequía, la temperatura incrementa, provocando la evapotranspiración de los cultivos, y, por ende, mayor necesidad de riego en algunos casos, ejerciendo más presión sobre la fuente hídrica, obteniendo así, disminución de los niveles del río, así como los caudales, incluyendo entonces no solo factores naturales, sino también acciones antropogénicas (González & Carvajal, 2020).

Figura 64

Índice de sequía de caudales SDI



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Tabla 27

Frecuencia de ocurrencia SDI.

Magnitud	Sin sequía	Sequía suave	Sequía moderada	Sequía severa	Sequía extrema	Total
N° eventos	61	14	10	8	3	96
Porcentaje	63,542	14,583	10,417	8,333	3,125	100

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Medición de Caudal y Parámetros de Calidad del Agua

La tabla 28 representa los puntos de monitoreo de agua (PMA-n), donde "n" indica el orden de cada uno en la zona de estudio con su respetivo nombre, georreferenciación y altitud.

Tabla 28

Caracterización puntos de monitoreo de agua.

Punto de monitoreo de agua	Nombre	Georreferenciación		
		N	W	Altitud (msnm)
PMA-01	Orocué	7,42439888	72,44167548	2416,6
PMA-02	Vereda Siberia	7,46125065	72,44714858	2114,0
PMA-03	El Tabor	7,50922785	72,4734063	1698,1

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Las figuras 65 y 66 muestran la ubicación de los puntos de monitoreo del agua a lo largo del río Táchira en la zona de estudio y el trabajo de campo llevado a cabo.

Figura 65

Ubicación puntos de monitoreo de agua.



Fuente: Elaborado en Google Earth Pro por Carvajal, D. (2024).

Figura 66

Monitoreo de agua.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

La tabla 29 representa los resultados obtenidos a partir de las mediciones llevadas a cabo en los meses de abril y junio para los tres puntos de monitoreo de agua.

Tabla 29

Parámetros in situ parte alta de la cuenca del río Táchira.

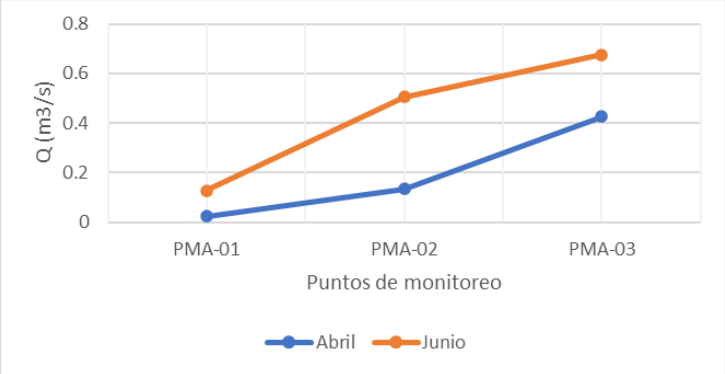
Parámetro	Unidad	Abril			Junio		
		PMA-01	PMA-02	PMA-03	PMA-01	PMA-02	PMA-03
Caudal total	m3/s	0,024	0,134	0,427	0,128	0,505	0,676
Temperatura	°C	16,4	17,4	21,9	15,8	15,9	18,9
pH	Adimensional	7,09	7,24	7,78	7,38	7,26	7,39
Oxígeno disuelto	mg/l	7,14	7,41	7,13	7,57	8,09	7,91
Conductividad	µs/cm	38,9	42,8	135,1	25,2	30,8	67,6
Resistividad	kΩ·cm	25,7	23,3	7,40	39,7	32,6	14,79
Salinidad	‰	0,02	0,02	0,06	0,01	0,01	0,03
Sólidos disueltos totales	mg/l	18,20	20,1	63,9	11,73	14,38	31,8

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Según la figura 67, se obtuvo mayor valor de caudal en el mes de junio para los tres puntos de monitoreo, lo cual concuerda con la época lluviosa que se da en la zona de estudio, señalando un comportamiento ascendente en el recorrido, lo cual indica que en la jurisdicción del PNN Tamá el flujo es mínimo, mientras que en las zonas rurales este es mayor debido a los diversos tributarios que conectan.

Figura 67

Caudal en los tres puntos de monitoreo del agua.

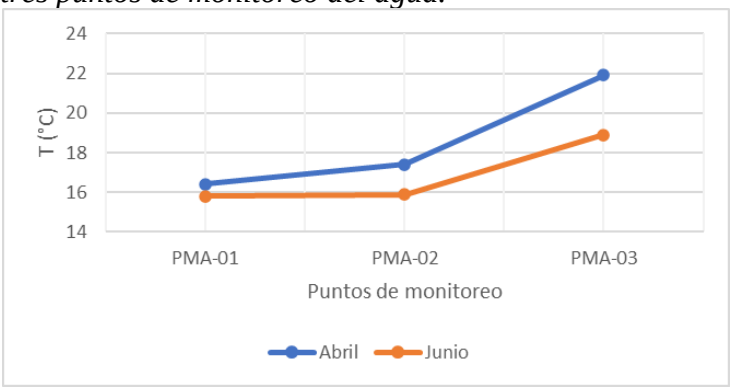


Fuente: Carvajal, D. (2024).

La figura 68 indica que la temperatura aumenta su valor a medida que se desciende en la cuenca, lo cual concuerda con lo mencionado por Escandón & Cáceres (2022), afirmando que, al disminuir la altura de una zona, la temperatura del agua en una fuente hídrica aumenta, siendo inversamente proporcionales en este caso. De igual modo se evidencia que las temperaturas en abril fueron más elevadas, debido a la temporada seca de dicho periodo, mientras que en el mes de junio la zona de estudio se caracteriza por su carácter lluvioso y de bajas temperaturas.

Figura 68

Temperatura en los tres puntos de monitoreo del agua.

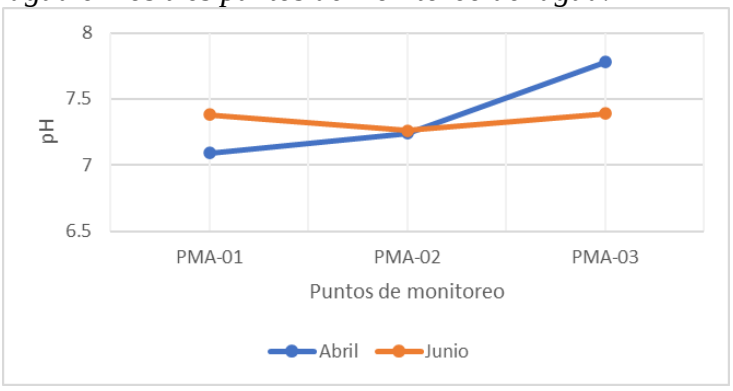


Fuente: Carvajal, D. (2024).

La figura 69 representa un pH neutro en los tres puntos de monitoreo del agua para abril y junio, cuyos valores se encuentran en la categoría de la mayoría de fuentes de agua natural siendo óptimo para el desarrollo de la vida acuática (Escandón & Cáceres, 2022). De igual modo, concuerda dentro del rango definido por la resolución 2115 del 2007, estableciendo que, el valor para el potencial de hidrógeno pH del agua para consumo humano con potabilización en base a un tratamiento convencional, deberá estar comprendido entre 5,0 y 9,0, y para la preservación de flora y fauna en aguas frías dulces con valores entre 6,5 a 9 (DANE, 2011).

Figura 69

pH de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua.



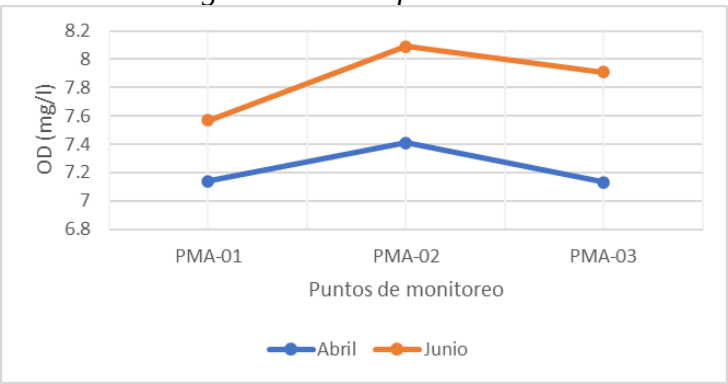
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Por otro lado, la figura 70, indica que, al descender en la cuenca, el oxígeno disuelto aumentó hasta el PMA-02 y terminó en disminución en el PMA-03 para ambas fechas, cuyos valores se encuentran en condiciones aceptables para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos según Quispe (2016). Por otro lado, la resolución 1096 de 2000 establece en su artículo 104 los procesos mínimos de tratamiento en función de la calidad del agua en una fuente aceptable, donde el valor de oxígeno disuelto para dicha función debe ser mayor o igual a 4 mg/l, cumpliendo en este caso dicha condición (DANE, 2007). Sin embargo, según el decreto 1594 de 1984 establece los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para la preservación de flora y fauna, siendo de 5 mg/l en aguas dulces frías y 4 mg/l en aguas

dulces calientes, valores que no cumplen en este caso. Resaltando de igual forma, un aumento significativo para el mes de junio, indicando mejor calidad del agua.

Figura 70

Oxígeno disuelto de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua.

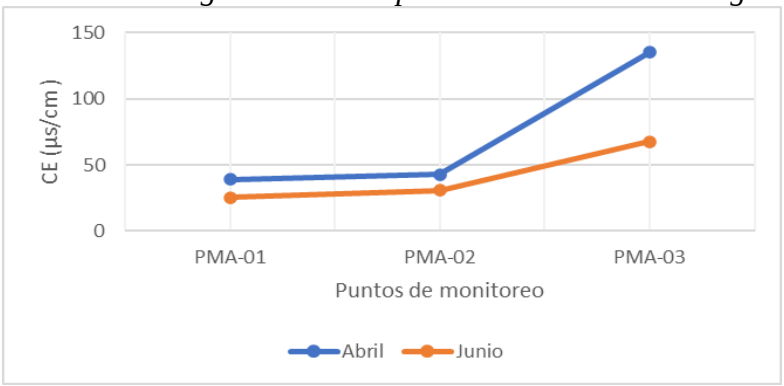


Fuente: Carvajal, D. (2024).

Según la figura 71, la conductividad eléctrica presenta un comportamiento ascendente en el transcurso del recorrido en la cuenca, teniendo un alto valor en el PMA-03 para ambas fechas, sobrepasando el promedio entre los otros dos puntos de monitoreo. Según la resolución 2115 de 2007, en el capítulo II se especifican las características físicas y químicas para el consumo humano, donde en el caso de la conductividad el valor máximo permisible puede ser hasta 1000 microsiemens/cm, cuyos resultados en los tres PMA se encuentran dentro de dicho rango.

Figura 71

Conductividad de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua.

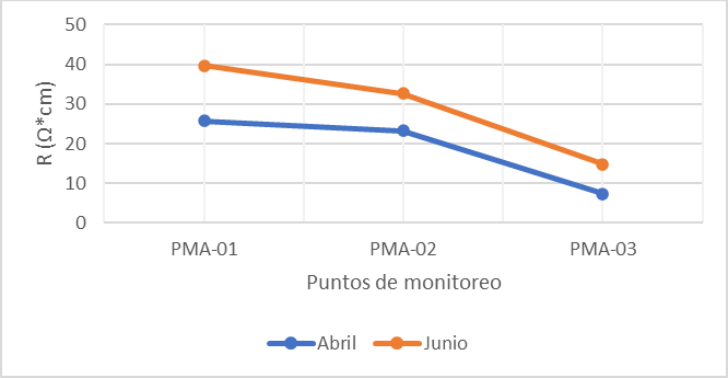


Fuente: Carvajal, D. (2024).

Según la figura 72, la resistividad presenta un comportamiento descendente en el transcurso del recorrido de la cuenca para ambos casos, cuyos valores no se encuentran dentro de la clasificación especificada por la Universidad de Granada, 2024, donde especifica que la resistividad mínima del agua potable a 20°C debe ser de 200 Ω*cm, ya que influyen sus temperaturas.

Figura 72

Resistividad de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua.

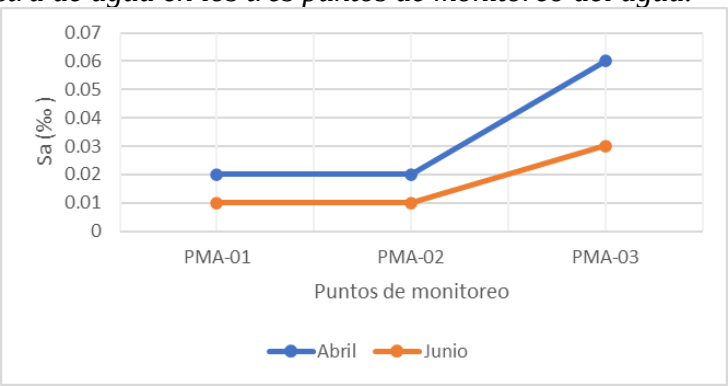


Fuente: Carvajal, D. (2024).

En la figura 73 se observa un comportamiento constante de salinidad en el transcurso de los puntos de monitoreo del agua PMA-01 y PMA-02 y un aumento en el PMA-03 para las dos fechas. Dahl (1956) establece que el rango para agua dulce es de 0-0,5‰, rango en el que entran los tres puntos de monitoreo. Sin embargo, se evidencia una disminución mínima de calidad en el PMA-03 debido a las actividades económicas a su alrededor.

Figura 73

Salinidad de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua.

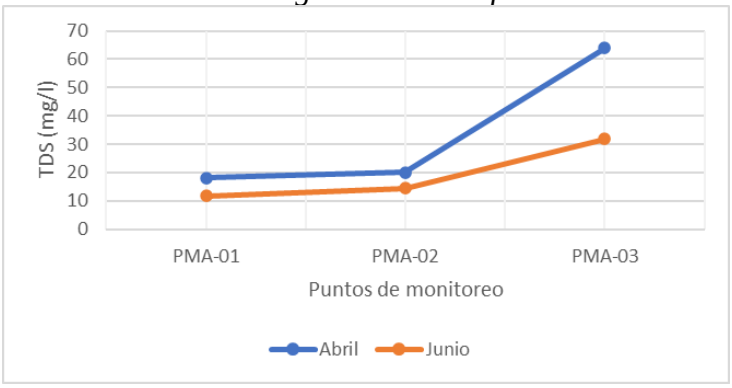


Fuente: Carvajal, D. (2024).

Según la figura 74, los sólidos disueltos totales medidos en los tres puntos de monitoreo presentaron un comportamiento ascendente para abril y junio. En este caso, cumpliendo con los valores permisibles para el consumo humano, no superando los 500 mg/l como lo especifica Sigler & Bauder (2012). De igual forma, la Organización Mundial de la Salud (OMS) determinó el efecto de los niveles del total de solidos disueltos (TDS) en la estética del agua, siendo este caso excelente para todos los casos, pues son valores menores a 300 mg/l. Sin embargo, según el aspecto, el PMA-03 posee un color intenso en comparación a los dos anteriores (Fluence, 2024).

Figura 74

Sólidos disueltos totales de la muestra de agua en los tres puntos de monitoreo del agua.



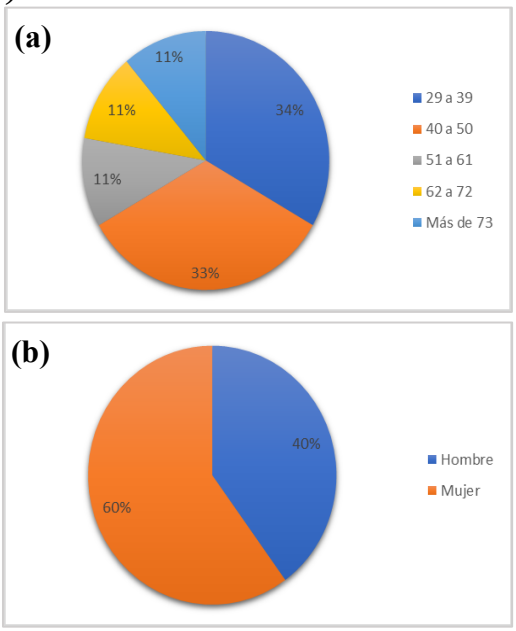
Fuente: Carvajal, D. (2024).

Oferta y Demanda Hídrica

Con el objetivo de obtener un registro y caracterización de la comunidad ubicada en la zona de influencia se implementaron encuestas recopilando información relevante en cuanto a datos personales, de vivienda, actividades económicas, usos del recurso, vivencias personales, propiedades, entre otros. Cuyos resultados se muestran de la figura 75 a la 81.

Figura 75

Datos personales. a) Edad, b) Sexo.

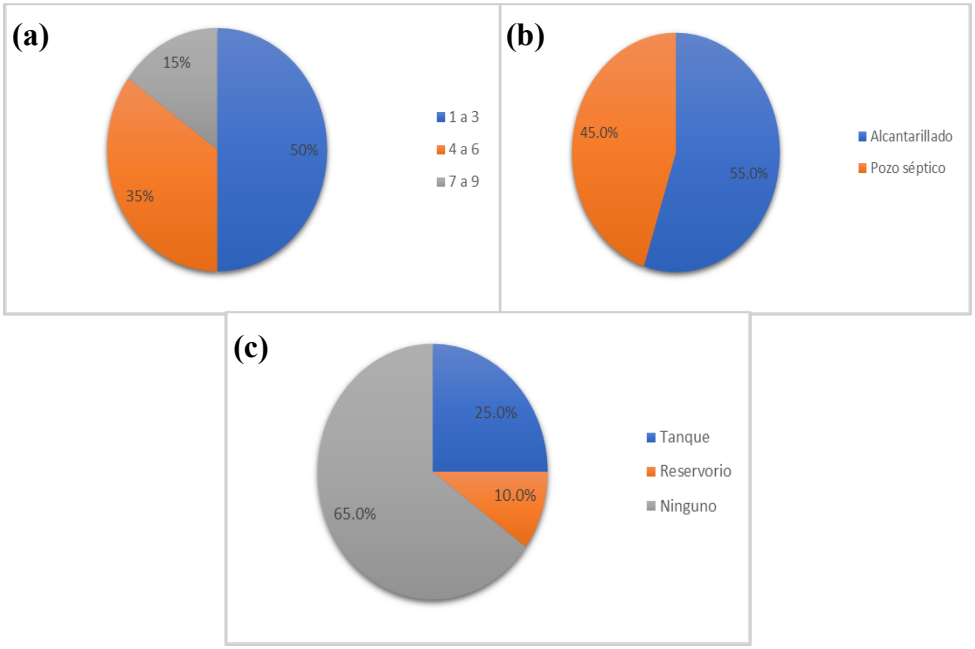


Nota. En la zona de estudio predominan las mujeres y las personas adultas, con un rango de edad entre 29 y 50 años.

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 76

Caracterización de vivienda. a) Número de personas que habitan en el hogar, b) Tipo de servicio sanitario y drenaje y c) Sistemas de almacenamiento de agua.

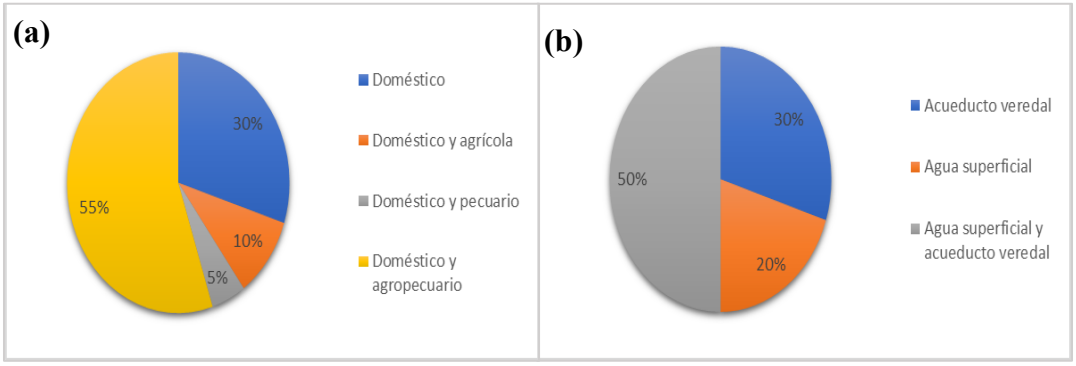


Nota. (a) El 50% de las viviendas en las zonas aledañas conforman hogares de 1 a 3 personas, seguido de familias de 4 a 6 integrantes, indicando que la población por vivienda es variada; (b) Las personas encuestadas cuentan con servicio de alcantarillado y pozo séptico principalmente como servicio sanitario y de drenaje; (c) No es común el uso de medios de almacenamientos de agua.

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 77

Usos del agua. a) Uso del recurso hídrico y b) Fuente abastecedora

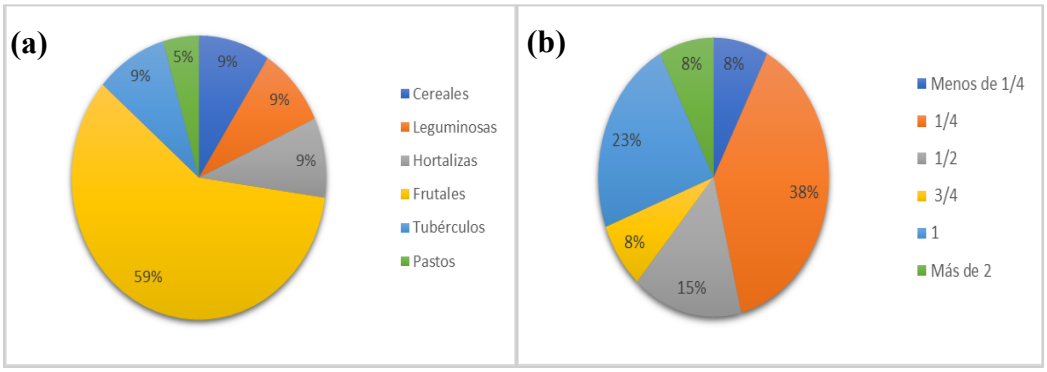


Nota. (a) Predomina el uso doméstico y agropecuario debido a las actividades económicas de la zona., (b) Los habitantes se abastecen del acueducto veredal para uso doméstico y agua superficial para uso agropecuario.

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 78

Uso agrícola. a) Tipos de cultivos y b) Área de los cultivos

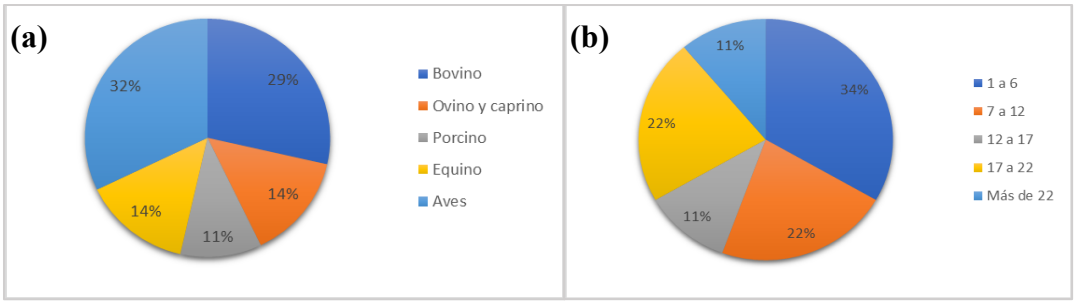


Nota. (a) Los habitantes principalmente cultivan frutales como la fresa y la mora., (b) Las áreas de los cultivos generalmente son de 1/4 a 1/2 ha.

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 79

Uso pecuario. a) Tipo de animales y b) Cantidad de animales grandes.

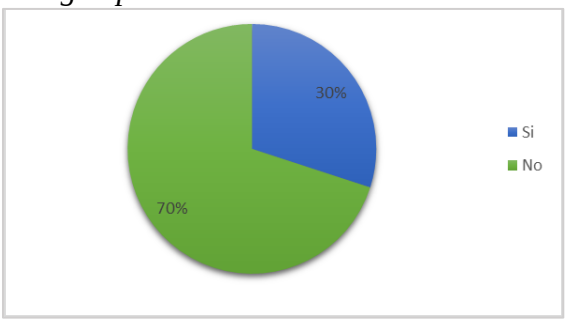


Nota. (a) Los habitantes tienen en su mayoría bovinos y aves como actividad pecuaria principal., (b) Con cantidad de animales grandes de 1 a 12.

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 80

Problemas con la calidad del agua potable.

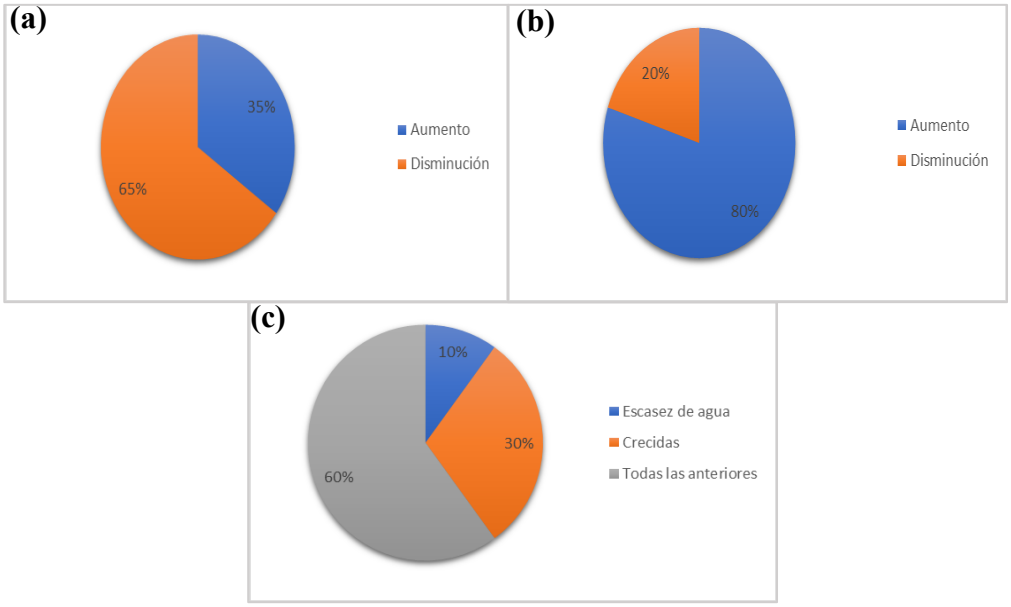


Nota. Generalmente no hay problemas con la calidad del agua, dado el caso de que si, es en tiempos de lluvia por los sedimentos en la fuente hídrica.

Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 81

Variabilidad climática. a) ¿Ha presenciado aumento o disminución de precipitación en los últimos años?, b) ¿Ha presenciado aumento o disminución de temperatura en los últimos años? y c) ¿Qué eventos naturales ha evidenciado?



Nota. a) y b) Los habitantes de la zona de estudio en su mayoría han presenciado disminuciones de la precipitación con aumentos de temperatura, condiciones comunes del fenómeno de El Niño. c) De igual modo, han vivido eventos como crecidas y sequías por igual.
Fuente: Carvajal, D. (2024).

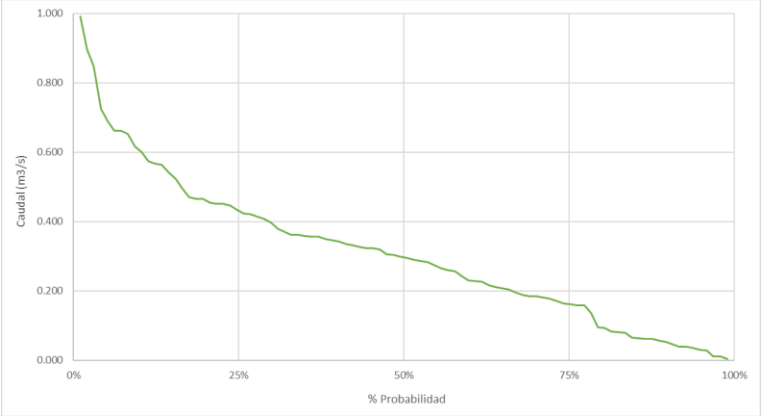
Por otro lado, la oferta hídrica obtenida en la cuenca arrojó un valor de 168 m^3/s, equivalente a 14515200 l/d con base en la curva de duración representada en la figura 82, la cual indica información sobre el porcentaje del tiempo en el que el caudal en un cauce excede un valor determinado. Según lo anterior, se deduce que, la probabilidad de que se exceda el valor más alto de caudal de 0,991 m3/s es del 1,03%, mientras que, la excedencia del caudal mínimo de 0,004 m3/s tiene una probabilidad del 98,97%.

Según la figura 83, en cuanto a la demanda doméstica se obtuvo un valor de 49280 l/d, la demanda pecuaria con un valor de 41351,2 l/d y la demanda agrícola de 4677,976 l/d, concluyendo una demanda hídrica total de 95309,176 l/d, predominando en este caso, la demanda doméstica por la cantidad estimada de habitantes, seguido de la demanda pecuaria debido a su gran utilización del recurso y, por último, la demanda agrícola a causa de áreas mínimas de los cultivos estimados.

De esta manera, a partir de los valores obtenidos de oferta y demanda hídrica, se obtuvo un índice de escasez del 0,654%, lo cual indica que no se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua según el IDEAM (2005), y, por ende, una demanda no significativa en cuanto al uso del recurso hídrico según la resolución 0865 de 2004.

Figura 82

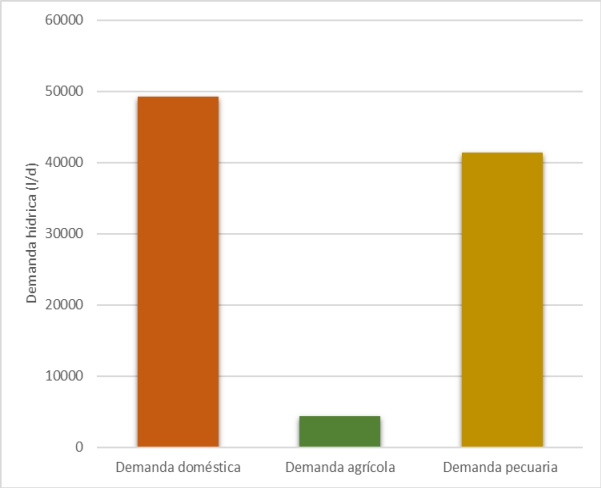
Curva de duración de caudales en el PNN Tamá.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Figura 83

Demanda hídrica sectorizada.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Alternativas de Mejora para la Toma de Decisiones en Cuanto a la Conservación de la Cuenca Estudio

Con base en los resultados obtenidos correspondiente al análisis de la variabilidad climática en la parte alta de la cuenca del río Táchira, se demostró la incidencia de las fases cálidas y frías del ENOS (EL Niño y La Niña) con respecto al comportamiento temporal de las variables meteorológicas temperatura y precipitación, las cuales interactúan y afectan directamente en la disponibilidad de agua en la zona de estudio. Por tal motivo, es necesario el implemento de medidas de mitigación y adaptación que se acoplen a las condiciones climáticas extremas por parte de la población afectada teniendo en cuenta la conservación de la cuenca hidrográfica, esto con el objetivo de mejorar el esquema estratégico de acción del PNN Tamá y así, llegar a resultados positivos tanto para la Unidad Administrativa Especial (UAE) como para las personas beneficiadas por esta importante fuente hídrica binacional.

Educación Ambiental

Las encuestas realizadas a la comunidad revelaron un alto porcentaje de falta de conocimiento sobre la variabilidad climática, lo que ha llevado a una escasa importancia en cuanto al manejo y protección del recurso hídrico. Por consiguiente, se sugiere la implementación de programas de educación ambiental, con el propósito de fomentar la comprensión acerca de los fenómenos climáticos extremos, sus orígenes, causas y consecuencias, logrando de esta manera, una concientización de la cuenca hidrográfica. Siendo así, es apropiada la continuación de campañas de educación ambiental implementadas por el PNN Tamá hacia las personas de todas las edades mediante actividades entretenidas, que sean atractivas al público, aportando como base primordial la conservación de las fuentes hídricas e incentivando el cuidado del recurso.

De igual modo, se sugiere el desarrollo de charlas de sensibilización en cuanto al uso agropecuario como actividad económica principal de la zona, con enfoque en los agroquímicos, debido a su carácter perjudicial tanto para el suelo como para el agua, promoviendo así, prácticas sostenibles que minimicen el impacto negativo e incentivando la participación activa de los habitantes para la resolución de problemas. También es evidente la preocupación en cuanto al manejo de los residuos sólidos en las zonas de amortiguación, en especial por la ausencia de servicio público de aseo, induciendo principalmente a la quema de las basuras, generando un problema tanto social como ambiental. Por lo tanto, se aconseja el planteamiento e implementación de campañas de reciclaje y reutilización, en conjunto con talleres de aprendizaje sobre las formas óptimas de reciclar y las ventajas que esto conlleva.

Reforestación en Áreas Degradadas

Las prácticas de reforestación son útiles para la restauración de ecosistemas y protección de la biodiversidad, de esta manera, contribuyendo a la mejora y recuperación de cobertura vegetal afectada ya sea por acción antropogénica o eventos naturales extremos. Por tal motivo, es óptimo implementar campañas de reforestación con la participación comunitaria en las zonas sensibles o con pérdida vegetal, de esta manera, reduciendo la erosión en las zonas susceptibles, e incentivando el cuidado de los ecosistemas y la conciencia ambiental. Esta medida implica la selección de especies nativas o adecuadas para cada área, junto con el monitoreo continuo y cuidado de los árboles plantados, considerando aspectos como la biodiversidad y la resistencia de los ecosistemas.

Diversificación de Cultivos

Es útil promover la diversificación en la producción agrícola de la zona, obteniendo una variedad de cultivos con el objetivo de reducir la dependencia a un solo producto y aumentar la resiliencia frente a eventos extremos como sequías, tormentas y olas de calor, adaptándose así, a la variabilidad climática en el ámbito económico. Esta práctica también puede optimizar el uso del agua al implementar cultivos con bajos requerimientos del recurso, reduciendo así, el estrés hídrico; al igual que la mejora de la seguridad alimentaria garantizando una disponibilidad más amplia de los alimentos. Por lo tanto, dicha opción tiene grandes ventajas, ya que, en caso de afectaciones a cultivos por condiciones climáticas adversas, otros pueden compensar dichas pérdidas, teniendo en cuenta las diferentes necesidades y tolerancias climáticas de cada tipo utilizado.

Medidas de Captación de Lluvia y Almacenamiento de Agua

En las épocas de sequía, donde se ve más influyente el fenómeno de El Niño, es común la escasez de agua en la zona, especialmente para el consumo humano y el uso agropecuario, por ende, es relevante la implementación de sistemas de captación de lluvia y almacenamiento de agua en periodos de tiempo adecuados, esto con el objetivo de aprovechar el recurso natural de una manera sencilla y viable económicamente, reduciendo así, la dependencia de agua de fuentes externas. Una de las maneras más comunes para la captación de aguas lluvias es la captación en techos y superficies por medio de canaletas, las cuales coleccionan el agua lluvia para dirigirla hacia sistemas de almacenamiento, como cisternas o tanques, diseñados para retener el agua de manera segura y eficiente; y así, posteriormente distribuirla para su uso en diferentes actividades en el hogar o en el sector agropecuario. Este método es ampliamente utilizado a nivel domiciliario y comunitario, y puede ser adaptado a zonas urbanas y rurales.

Monitoreo Hidroclimático

A partir de las limitaciones del actual proyecto, es óptimo implementar mejoras en cuanto al monitoreo continuo de las variables hidrometeorológicas presentes en la zona, esto con el objetivo de la mejor comprensión en cuanto a los patrones climáticos y así, facilitar la toma de decisiones respecto a las medidas de adaptación a la variabilidad climática, con énfasis en el comportamiento, disponibilidad y calidad del recurso hídrico, y la reducción de riesgos inherentes al clima a corto, mediano y largo plazo. Lo cual se puede alcanzar consiguiendo acuerdos y alianzas estratégicas con las corporaciones, alcaldías o entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) o la Alcaldía de Herrán, Norte de Santander, con el objetivo de reforzar la información relevante que influye en el comportamiento de la zona protegida y así, de igual modo, incentivar a la continuación investigativa con colegios, universidades y demás instituciones educativas que deseen aportar conocimiento relacionado al Parque Nacional Natural Tamá y sus zonas de amortiguación.

Implementación de Actividades de Concientización y Participación con la Comunidad, Enfocadas en la Preservación de la Cuenca del Río Táchira

Se orientó y concientizó a la comunidad aledaña a la zona de estudio por medio de charlas de educación ambiental en cuanto a la conservación de la parte alta de la cuenca del río Táchira, esto con el objetivo de implantar conocimiento sobre la importancia de la fuente binacional, las consecuencias de su uso inadecuado y las medidas y recomendaciones de su cuidado. De igual forma, se reforzó la comprensión en cuanto al término de variabilidad climática de una manera didáctica y fácil de entender, para luego, llevar a cabo el debate de opiniones y experiencias propias en cuanto a las afectaciones que han soportado debido al fenómeno climático. En la figura 84 se muestra la reunión con la comunidad y la participación activa de esta.

Figura 84

Charlas de educación ambiental.



Fuente: Carvajal, D. (2024).

Conclusiones

La zona de estudio se caracteriza por ser una cuenca montañosa, madura y en equilibrio, ligeramente alargada de oval redonda a oval oblonga, con media a alta producción sostenida de caudales y moderado potencial de crecientes, caracterizada por tener una pendiente fuertemente accidentada, indicando un aumento en la escorrentía superficial y arrastre de materiales, con un tiempo de concentración mínimo y pendientes altas y medias en el cauce principal evaluando una alta y media velocidad de flujo del agua en la red de drenaje.

En cuanto a la cobertura vegetal, predomina en la parte superior el bosque denso, los pastos limpios, espacios naturales y la vegetación secundaria o en transición, indicando una mínima intervención. De igual modo, los sectores medios e inferiores de la cuenca se caracterizan por tener tejido urbano y mosaicos de pastos y cultivos con presencia de actividad antrópica. La geología de la cuenca superior se caracteriza por tener formaciones con lododitas, areniscas y calizas en las formaciones de Colon, La Luna y Capacho, con indicación de procesos erosivos y arrastre de materiales a causa de la pendiente pronunciada, mientras que, en la parte inferior predominan los depósitos aluviales, indicativo de la acumulación de sedimentos generada por el proceso nombrado anteriormente, y las formaciones Los Cuervos, Mirador y Colon-Mito Juan con alta presencia de fragmentos carbonos y lododitas. De igual forma, se evidencian dos fallas importantes que enfrenta la cuenca, conocidas como “Falla Samaria-Loma Cordillera Santa Isabel” y “Falla el Trapiche. Por último, la litología indica arcillas y arenas principalmente.

Las variables hidrometeorológicas presentes en la cuenca estudio indicaron comportamientos constantes con ciertos picos y valores atípicos, por un lado, la precipitación y la temperatura abarcaron valores entre los 10 y 250 mm y 12 y 16 °C respectivamente, sin embargo, evidenciando picos comunes de temporadas relacionadas con la presencia del fenómeno de El Niño y La Niña, con temporadas húmedas entre los meses de junio y julio, y temporadas secas con altas temperaturas entre diciembre, enero y febrero. Demostrando de igual modo, el régimen monomodal de la precipitación y bimodal de la temperatura, con afectación significativa en el evento de La Niña para el año 2015, demostrando baja de precipitaciones y aumento de temperaturas en dicho periodo de tiempo. En cuanto al caudal medio mensual se presentaron picos para los meses de junio y julio característicos de las temporadas más lluviosas, con mínima disminución en el transcurso de los años hasta el 2021.

Al correlacionar las variables meteorológicas con respecto a los índices macroclimáticos, se demuestran valores significativos, con correlación positiva para la temperatura y negativa para la precipitación. Indicando así, que en las fases cálidas del ONI y el MEI.v2 suele presentarse un aumento de la temperatura y, por ende, una disminución de precipitación, de igual modo, en la fase fría la temperatura puede que disminuya y la precipitación incrementa sustancialmente, concluyendo así, la incidencia del fenómeno ENOS en la zona de estudio. A partir de lo anterior, se concluyó que, al relacionar la precipitación y temperatura con base en el caudal, se demuestra que, a mayor temperatura menor caudal, y a mayor precipitación, se presenta un incremento de caudal, siendo esta última variable la más influyente sobre el comportamiento del recurso hídrico, por ende, es posible una indirecta incidencia de los índices macroclimáticos sobre el caudal.

Por último, se plantearon alternativas de mejora adecuadas para la toma de decisiones con respecto a la conservación de la parte alta de la cuenca del río Táchira y adaptación a la variabilidad

climática, exponiendo su importancia hídrica por su carácter binacional y abastecimiento a las zonas aledañas, teniendo presente la participación de la comunidad y la sensibilización frente a temas relacionados con el cuidado del recurso y la importancia del PNN Tamá como área de reserva.

Recomendaciones

Se sugiere la implementación de convenios con empresas públicas, alcaldías o institutos de investigación para la instalación o activación de estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio o cerca a esta, y así, continuar con el monitoreo hidroclimático tanto en el área protegida como en los sectores de amortiguación, esto con el fin de obtener un registro continuo en cuanto a eventos extremos relacionados con variabilidad climática, para finalmente plantear e implementar medidas adecuadas para la adaptación evitando riesgos a la comunidad aledaña.

Para trabajos futuros relacionados con la parte alta de la cuenca del río Táchira, sería apropiado reanudar los monitoreos constantes basados en la calidad del agua y comportamiento del caudal en los puntos representativos de la zona, en este caso, teniendo en cuenta otros parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), nitratos, fosfatos, entre otros, con el fin de estimar un índice completo de calidad del agua.

Se recomienda al Parque Nacional Natural Tamá continuar con el trabajo encaminado al valor objeto de conservación (VOC) de la parte alta de la cuenca del río Táchira, manteniendo un seguimiento regular y actualización de estrategias o medidas que respaldan los impactos generados en la zona, implementando así, acciones para eliminar o mitigar las amenazas tanto naturales como antropogénicas, de esta manera, determinando el cumplimiento de las metas propuestas.

Se hace una invitación a la comunidad aledaña de la parte alta de la cuenca del río Táchira a tomar conciencia en cuanto a la importancia de la fuente hídrica binacional, haciendo uso adecuado del recurso y velando por su conservación, cuyo objetivo es beneficiar tanto la zona protegida como el bienestar y calidad de vida de los propios habitantes.

Referencias

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T., & Wieringa, J. (2003). *Guidance on metadata and homogenization.* Organización Meteorológica Mundial – WMO, Programa Mundial de Monitoreo y Datos Climáticos.

Área metropolitana valle de Aburrá. (2019). *Manual para la realización de aforos de caudal en fuentes superficiales de agua*. Subdirección Ambiental.

Arévalo, B. (2023). *Evaluación de la influencia de la variabilidad climática en la disponibilidad del recurso hídrico de la quebrada Monteadentro en Pamplona.* Trabajo de grado, Universidad de Pamplona.

Arujo, T & Rivera, M. (2021). *Índices de Sequía para la Cuenca del Río Cesar – Colombia.* Revista Ambiental Agua, Aire Y Suelo. Semillero de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (SIAAS). Universidad de Pamplona.

Avance Jurídico. (2023). *Ley 2169 de 2021.*

Baldeon, L. (2016). *Modelamiento hidrológico de la sub Cuenca del rio Achamayo.* Para optar el grado académico de Magister Scientiae en Gestión sostenible de Cuencas Hidrográficas. Repositorio UNCP. http://hdl.handle.net/20.500.12894/4588

Barrios, J. (2021). *Índices Locales del Ciclo El Niño Oscilación del Sur para las Regiones Naturales de Colombia.* Universidad Nacional de Colombia.

Borunda, A. (2022). *¿Qué es el fenómeno de El Niño y La Niña?* National Geographic. https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-fenomeno-de-el-nino-y-la-nina

Cacciamani, C., Morgillo, A., Marchesi, S., & Pavan, V. (2007). *Monitoring and Forecasting Drought on a Regional Scale: Emilia-Romagna Region.* Chapter 2. (pp. 29-48).

Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López, A., Del río, J & De Marco, S. (2018). *Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires.* https://www.redalyc.org/journal/3832/383257036005/html/

Campos, D. (2020). *Evolución de los índices comunes de detección y seguimiento de sequías meteorológicas.* Tecnol. cienc. agua vol.11 no.1. SciELO.

Cao, L & Yan, Z. (2012). *Progress in research on homogenization of climate data. Advances in Climate Change.*

Castellón, N. (2022). *Estacionariedad en la Serie de Tiempo.* https://www.linkedin.com/pulse/estacionariedad-en-la-serie-de-tiempo-naren-castellon/

Castro, Y., Zúñiga, L & Mora, D. (2017). *La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. Rica.* Tecnología en Marcha. Vol. 31-1. Pág 35-46.

Cea, M & Martínez, V. (2023). *Fenómeno de El Niño pasaría a fase neutral entre abril y junio de 2024.* La prensa gráfica. https://www.laprensagrafica.com/elsalvador/Fenomeno-El-Nino-pasaria-a-fase-neutral-entre-abril-y-junio-de-2024-20231214-0095.html

Ceballos, L & Poveda, G. (2005). *Diagnóstico y predicción de El Niño 2002-2003.* Avances en recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Comisión Colombiana del Océano. (2015). *Eventos extremos.* Asuntos Marinos.

Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993.* Departamento Administrativo de la Función Pública. Diario Oficial, pp. 60.

Consorcio Pomca Quindío. (2018). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río La Vieja.* Actualización POMCA río La Vieja. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/202002/Documento_General_POMCA_LaVieja.pdf

Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare. (2007). *Resolución número 0865 (Julio 22 de 2004).* Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial.

Corporación Autónoma Regional de Nariño. (2014). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico quebrada Boyacá.* Subdirección de conocimiento y evaluación ambiental.

Corradine, M. (2017). *Caracterización físico-biótica de la cuenca.* Actualización POMCA río Garagoa. https://www.car.gov.co/uploads/files/5c1a9fcf99956.pdf

Correa, L., Ocampo, O & Alba, M. (2021). *Análisis de tendencia de temperatura y precipitación para el departamento de Caldas (Colombia), mediante wavelets.* Ciencia e Ingeniería Neogranadina.

Da Silva, V., Lima, E., Santos, R., Campos, B., Mota, N & Silva, S. (2021). *Interpretando A Diversidade Climática Do Acre Através Da Leitura De Climogramas.* Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia. https://periodicos.ufac.br/index.php/Uaquiri/article/view/5211

Dahl, E. 1956. *Límites ecológicos de la salinidad en aguas poiquilohalinas.* Oikos. 7(I): 1–21 en Rosell V., L. 2009. Evaluación de la calidad de las aguas de la Bahía de Bluefields (Raas, Nicaragua). Escola Superior D'enginyeria Técnica Agraria de Barcelona.

DANE. (2007). *Ficha técnica.* Sistema de Información del Medio Ambiente. Oxígeno disuelto. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Odisuelto.pdf

DANE. (2011). *Ficha técnica.* Sistema de Información del Medio Ambiente. pH. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/pH_13.pdf

DANE. (2011). *Ficha técnica.* Sistema de Información del Medio Ambiente. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Oxigeno_disuelto_13.pdf

Dastec. (2012). *OTT MF pro.* Técnica moderna para condiciones difíciles. OTT Hydromet GmbH. https://www.dastecsrl.com.ar/uploads/productos/ott-hydromet/mf-pro_caudalimetro-electro-magnetico-inductivo-aguas-subterraneas_ott-hydromet1.pdf

datacamp (2024). *Tutorial de RStudio.* https://www.datacamp.com/es/tutorial/r-studio-tutorial

Díaz, I., García, C., León, M., Ruiz, F & Torres, F. (2014). *Guía de Asociación entre variables (Pearson y Spearman en SPSS).* Universidad de Chile.

Díaz-Barriga, U., López, R., Lluviaria, T., Torres, I., Galván, E. (2019). *Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma.* Aqua-LAC Volumen 11(2), 17-28. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-02

Domínguez, E., Rivera, H., Vanegas, R & Moreno, P. (2023). *Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano.* Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 32 Núm. 123.

DrinC Software. (2024). *DrinC. Drought Indices Calculator.* https://drought-software.com/overview/

Duarte, V. (2018). *Morfometría de cuencas, la forma de la cuenca.* https://docplayer.es/62070044-1-introduccion-2-definiciones-3-datos-4-representacion-5-conclusiones-morfometria-de-cuencas-2-morfometria-de-cuencas-2.html

Epidat. (2014). *Análisis descriptivo. Sergas.* https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1891/Ayuda_Epidat_4_Analisis_descriptivo_Octubre2014.pdf

Escandón, C & Cáceres, M. (2022). *Análisis de la calidad del agua mediante parámetros físicos químicos y macroinvertebrados bentónicos, presentes en la microcuenca del río San Francisco-Gualaceo.* https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21649/1/UPS-CT009509.pdf

Euscátegui, C & Hurtado, G. (2011). *Análisis del impacto del fenómeno "La Niña" 2010-2011 en la hidroclimatología del país.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Fajardo, G & Franco, J. (2004). *Análisis estadístico de la relación del fenómeno ENOS El niño oscilación sur en las variables hidrometeorológicas de caudal y temperatura en la cuenca alta del Río Magdalena.* Ciencia Unisalle. Universidad de La Salle.

Ferrelli, Bustos, Perillo, & Piccolo. (2021). *Evaluación de variables meteorológicas modeladas para determinar el clima de ciudades costeras argentinas.* Investigaciones Geográficas, pp. 76.

Ferrero, R. (2020). *Cómo evaluar si la correlación es significativa: pruebas de hipótesis para la correlación.* Máxima Formación. https://www.maximaformacion.es/blog-dat/como-evaluar-si-la-correlacion-es-significativa-pruebas-de-hipotesis-para-la-correlacion/

Flórez, A & Torres, L. (2022). *Análisis de correlación de índices macroclimáticos del fenómeno del niño y la niña con respecto a la precipitación en la región andina colombiana*. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia].

Fluence. (2024). *Sólidos Disueltos y Purificación del Agua.* FLUENCE NEWS TEAM. https://fluencecorp.com/es/purificacion-de-agua-y-solidos-disueltos/

Fonseca, L., Tinjaca, Z., Laverde, A. (2022). *Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Tamá.* Parques Nacionales Naturales de Colombia.

Fuentes, J. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del parque nacional.*

Fúquen, J., Ceballos, L., Pedraza, A & Marín, E. (2010). *Geología de la plancha 99 Villa del Rosario.* Instituto Colombiano de Geología y minería INGEOMINAS.

Función Pública. (2024). *Decreto 1449 de 1977.* Colombia potencia de la vida.

Función Pública. (2024). *Decreto1594 de 1984.* Colombia potencia de la vida.

Función Pública. (2024). *Decreto 2372 de 2010.* Colombia potencia de la vida.

Función Pública. (2024). *Ley 1523 de 2012.* Colombia potencia de la vida.

Función Pública. (2024). *Decreto 1640 de 2012.* Colombia potencia de la vida.

Función Pública. (2024). *Decreto 1090 de 2018.* Colombia potencia de la vida.

Función Pública. (2024). *Ley 1931 de 2018.* Colombia potencia de la vida.

García, D. (2019). *¿Qué es el Ph?* Cuaderno de Cultura Científica. https://culturacientifica.com/2019/11/28/que-es-el-ph/

García, M & García, M. (2012). *Los métodos de investigación.* Guía práctica para la realización de trabajos fin de grado y trabajos fin de Master.

Gelvez, D; Rivera, M &Solano, F. (2020). *Análisis estadístico de parámetros hidrometeorológicos, fisicoquímicos y microbiológicos incidentes en la calidad de la quebrada Monteadentro.* Universidad de Pamplona.

GetApp. (2024). *Xlstat.* Software de estadísticas para Microsoft Excel. https://www.getapp.com.co/software/2046804/xlstat#faq

Godoy, I. (2017). *Climogramas.* SlidePlayer. https://slideplayer.es/slide/11806027/

González, N & Carvajal, Y. (2020). *Caracterización de sequías hidrológicas en el río Cauca en su valle alto.* SciELO. Tecnología y ciencias del agua. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222020000100235

Grubbs, F. (1969). *Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples.* American Statistical Association and American Society for Quality.

Grubbs, F & Beck, G. (1972). *"Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations"*, Technometrics, 14(4), 847-854.

Guevara Díaz, J. M., (2014). *Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin.* Terra. Nueva Etapa, XXX (47), 79-102.

Hach. (2024). *Multímetro portátil HQ40D para mediciones de pH, conductividad, salinidad, TDS, oxígeno disuelto (OD), ORP e ISE en agua.* https://latam.hach.com/multimetro-portatil-hq40d-para-mediciones-de-ph-conductividad-salinidad-tds-oxigeno-disuelto-od-orp-e-ise-en-agua/product?id=54617078188

Hanna Instruments. (2024). *Resistividad.* Hanna Instruments Equipos LTDA. https://hannachile.com/resistividad-medidores-hanna-chile/

Hernández, R & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación.* McGraw-Hill Interamericana.

IDEAM. (2005). *Estudio Nacional del Agua 2005.*

IDEAM. (2006). *Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas.* Subdirección de hidrología grupo-laboratorio de calidad ambiental.

IDEAM. (2024). *Conceptos básicos de cambio climático.* http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas#:~:text=La%20variabilidad%20del%20clima%20se,all%C3%A1%20de%20fen%C3%B3menos%20meteorol%C3%B3gicos%20determinados.

IDEAM – UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*, Bogotá, D.C.

Kisbye, P. (2010). *Test de Kolmogorov-Smirnov.* FaMAF. https://www.famaf.unc.edu.ar/~kisbye/mys/clase17_pr.pdf

Lanza, G. (1999). *Educación Ambiental para el Trópico de Cochabamba.* Texto del alumno.

Loaiza, W., Carvajal, Y & Baquero, O. (2015). *Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia.* Estudios Geográficos, vol. LXXVI, 279, pp. 557-578.

López, D., Pinzón, C & Barrera, A. (2016). *Los suelos en las cuencas hidrográficas.* https://prezi.com/fmlf8gdd-u0_/los-suelos-en-las-cuencas-hidrograficas/

Marcano, L & Fermín, W. (2013). *Comparación de métodos de detección de datos anómalos multivariantes mediante un estudio de simulación.* https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622013000200009#:~:text=Los%20valores%20an%C3%B3malos%20son%20un,m%C3%A9todos%20estad%C3%ADsticos%20univariantes%20o%20multivariantes.

Martínez, C & Velásquez, J. (2011). *Análisis de dependencias no lineales utilizando redes neuronales artificiales.* Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 60, septiembre, 2011, pp. 182-193. Universidad de Antioquia.

Martínez, D. (2022). *Análisis de las variables climatológicas (humedad relativa, temperatura, precipitación y evaporación) en la cuenca del río Bogotá en los años de 1996 y 2018.* Universidad militar nueva granada. Especialización en geomática, Bogotá-Colombia.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2020). *Resolución 1096 de 2000.*

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2020). *Resolución 2115 de 2007.*

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2022). *Resolución 0330 de 2017.*

Mora, R. (2022, Marzo 30). *#RíoTáchiraEnvenenado: una cuenca binacional que agoniza en silencio en Colombia.* MONGABAY, periodismo ambiental independiente en Latinoamérica. https://es.mongabay.com/2022/03/río-tachira-envenenado-cuenca-binacional-agoniza-en-colombia/

Muñoz, C. (2003). *Esquema para el comentario de climogramas.* Geografía 2º de Bachillerato, Ed. Anaya, Madrid. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://apuntesdegeografia.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/11/esquema-comentario-climograma.pdf

Nascimento, J y Wiecheteck, M. (2014). *Como Implementar la Política de Tierras de Vocación Forestal.* RuralProsper Notas Técnicas e de Politica.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *CropWat.* Tierras y Aguas. https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2012). *Índice normalizado de precipitación.* Guía del usuario.

Organización Meteorológica Mundial (OMM) & Asociación Mundial para el Agua (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs).* Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra.

Organización Mundial de la Salud. (2023). *El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).* https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/el-nino-southern-oscillation-(enso)

Ortega, C. (2024). *¿Qué es el coeficiente de correlación de Pearson?* QuestionPro. https://www.questionpro.com/blog/es/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/

Ortiz, H; Escobar, C & Sepúlveda, S. (2018). *Statistical analysis of the climatological variables an their potential applications in the city of Cúcuta.* Respuestas, Journal of Engineering Sciences, pp. 39-40.

Palma, R. (2020). *Analítica de Datos Industriales para la Toma de Decisiones.* ADI&TD. Curso de posgrado. Universidad Nacional de Cuyo. https://themys.sid.uncu.edu.ar/rpalma/Analitica_Industrial/index.html

Paris, M., D'Elia, M., Pérez, M & Tujchneider, O. (2002). *Análisis estocástico de variables hidrometeorológicas para la estimación de recarga de acuíferos.* Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Groundwater And Human Development.

Pico de Tancítaro. *Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico.*

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2015). *Parque Nacional Natural Tamá.* Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

Peña, C. (2024). *¿Por qué llueve en Colombia durante el fenómeno de El Niño?: esto dice el IDEAM.* https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/por-que-llueve-en-colombia-durante-el-fenomeno-de-el-nino-esto-dice-el-ideam-851172

Plata C., Ortíz R., Marentes E & Lozano J. (2021). *Laboratorio de datos, Ciclo de formación.* Consultado a través del SiB Colombia. https://biodiversidad.co/formacion/laboratorios/QGIS

Quispe, M. (2016). *Estudio del comportamiento del oxígeno disuelto y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Bahía Interior de Puno.* https://repositorio.uwiener.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13053/532/QUISPE%20LUJANO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ramírez, C., Vélez, J & Peña, A. (2018). *Analizando índices climáticos para predecir la lluvia mensual en una región agrícola de los andes del norte (Caldas, Colombia).* Investig. Geogr. Chile, 55: 111-126.

Ribera, F. (2016). *Salinidad y aguas subterráneas.* Hidrogeología emergente.

Rios, E., González, I., Cotler, H & Pineda, R. (2013). *Cuencas hidrográficas.* Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Rojas, A & Sherezade, G. (2022). *Análisis de correlación y teleconexión entre las precipitaciones extremas recurrentes del norte del Perú y anomalías de temperatura superficial del mar.* Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

Rojas, M., Figueroa, A., Ruiz, D., Otero, J., Martínez, J., Ceballos, V., Joaquí, S & González, D. (2014). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad en cuencas abastecedoras de agua ante la variabilidad climática.* SciELO.

Romero, P & González, M. (2016). *Relación entre caudales y precipitación en algunas cuencas de la Patagonia norte.* Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, N.º 36, pp. 7 – 13.

Romero, R. (2022). *Series de tiempo.* https://randall-romero.github.io/econometria/teoria/01-intro/05-series-tiempo.html

Royero, J., Zambrano, J., Daconte, R., Mendoza, H & Vargas, R. (1999). *Geología de la plancha 111 Toledo.* Instituto Colombiano de Geología y minería INGEOMINAS.

Samboni, N., Carvajal, Y & Escobar, J. (2007). *Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua.* Ing. Investig. vol.27 no.3 Bogotá. SciELO.

Sánchez, C. (2023). *Las pruebas de normalidad. Instituto Nacional de Meteorología de Colombia (INM).* ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/366922523_Las_pruebas_de_normalidad

Sigler, W & Bauder, J. (2012). *Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales.* Well Educated. https://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS%202012-11-15-SP.pdf

Sistema de Información Ambiental para Colombia. (2024). *Fenómenos del Niño y la Niña.* http://www.ideam.gov.co/web/siac/ninoynina#:~:text=El%20Fen%C3%B3meno%20de%20%22el%20Ni%C3%B1o,departamentos%20de%20la%20regi%C3%B3n%20Caribe.

Trujillo, A. R., Barroso, F. U., & Escobar, Y. C. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (1st ed.).* Universidad del Valle. http://www.jstor.org/stable/j.ctt1rfsqf5

Universidad Complutense de Madrid. (2024). *Descripción de indicadores.* https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-pH%20f.pdf

Venegas, J. (2020). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios en el período 2006-2018 para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito.* Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador. Área de Estudios Sociales y Globales, pp. 94.

Zhicay, J. (2020). *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, Cantón Gualaceo.* Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18364

Anexos

Anexo 1

Encuesta para la determinación de la demanda hídrica.

CENSO/BENEFICIARIOS DEL RECURSO HÍDRICO EVALUADO

Elaborado por: Darly Yusendy Carvajal Velasco. Estudiante de Ingeniería Ambiental.
Revisado por: Lic. PhD. María Esther Rivera y Geol. Msc. Jesús Ramón Delgado Rodríguez.
Parque Nacional Natural Tamá
Universidad de Pamplona
2024

OBJETIVO

La presente encuesta busca recopilar información con el objetivo de estimar la demanda hídrica de la zona de estudio estipulada en el proyecto "Análisis de la variabilidad climática en el parque el Tamá en su área de influencia con la cuenca del río Táchira", la cual se realiza exclusivamente con fines académicos, cuya información se respalda en base a la ley 1581 del 2012 (Política de protección de datos personales). Frente a cualquier inquietud se puede comunicar con el responsable de la encuesta al número de celular 3108140892 o al correo electrónico darly.carvajal@unipamplona.edu.co

INFORMACIÓN GENERAL

Zona de estudio	Parte alta-Cuenca del río Táchira	**Fecha (dd/mm/yyyy)**		**Municipio**		**Vereda**	
Fuente hídrica		**Coordenadas**		**Altura (msnm)**		**N° de encuesta**	

INFORMACIÓN PERSONAL

Nombre									
Teléfono		**Edad**		**Sexo**	F	M	**Ocupación**		

USO DOMÉSTICO

Fuente abastecedora	Agua superficial	Agua subterránea	Agua lluvia	Acueducto veredal	**Número de personas que habitan el hogar**	1 - 3	4 - 6	7 - 9	Más de 9
¿Recibe el servicio de agua potable por tubería?	Si	No	**¿Por cuál otro medio?**		**¿Posee sistemas de almacenamiento de agua?**	Si	No	**¿Cuál?**	Tanque	Reservorio	Caneca	Otro	
¿Con qué tipo de servicio sanitario y drenaje cuenta?	Alcantarillado	Pozo séptico	Otro		**¿Qué tratamiento les aplica a los residuos sólidos generados?**	Servicio público de recolección	Liberación a la fuente hídrica	Quema	Otro	

USO AGROPECUARIO

Captación	Agua superficial		Agua subterránea			Agua lluvia	
¿Posee sistemas de almacenamiento de agua?			No	Si	**¿Cuál?**	Estanque	Tanque	Otro

PECUARIO

Tipo	Bovino	Ovino y caprino	Porcino	Equino	Avicultura	Acuicultura		
Cantidad						**N° peces**		
Formas de explotación	Ganadería intensiva		Ganadería extensiva			**N° pozos**		
						Volumen (m3)		
Etapa (bovino)	Ternero		Vaquilla/Torillo		Vaca/Toro			
¿Cómo suministra el agua a los animales?	Directamente de la fuente hídrica		Bebederos					

AGRÍCOLA

¿Qué cultivos posee?	Cereales	Leguminosas	Oleaginosas	Hortalizas	Frutales	Ornamentales	Tubérculos	Pastos
Área (ha)								
Fase de los cultivos	Establecimiento		Crecimiento rápido			Endurecimiento		
Tipo de riego	Goteo	Aspersión	Bombeo	Gravedad	Otro			
Usos	Consumo propio		Comercio		Alimento de animales			

CALIDAD DEL AGUA

¿Tiene problemas con la calidad del agua potable?	No	Si	**¿Con qué características?**	Mal sabor	Olor desagradable	Color inusual	Contaminación	Turbiedad
¿Realiza algún tipo de tratamiento?	No	Si	**¿Cuál?**					

VARIABILIDAD CLIMÁTICA

¿Ha escuchado sobre la variabilidad climática?	No	Si	**¿Qué conoce del término?**					
¿Ha presenciado eventos de escasez de agua?	No	Si	**¿En qué meses?**					
			Descripción / Abastecimiento de apoyo					
¿Ha presenciado eventos de crecidas?	No	Si	**¿En qué meses?**					
			Descripción					
¿Ha notado una disminución o aumento de precipitación en los últimos años?	Disminución		Aumento	**¿Las actividades agropecuarias llevadas a cabo en la zona se han visto afectadas por la variabilidad del clima?**	No	Si	**Descripción**	
¿Ha notado una disminución o aumento de la temperatura en los últimos años?	Disminución		Aumento					

Fuente: Carvajal, D. (2024).