



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y

AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CENTRALES

HIDROELÉCTRICAS “LA ALGODONERA” Y “ATUNTAQUI” DE

SERMAA EP

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías

Renovables

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR

KENNETH JAIR QUILUMBA ESPAÑA

DIRECTOR

PAÚL MICHAEL TAFUR ESCANTA

Ibarra-Ecuador-2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1750342568		
APELLIDOS Y NOMBRES:	QUILUMBA ESPAÑA KENNETH JAIR		
DIRECCIÓN:	IBARRA IMBABURA		
EMAIL:	kennethespana31@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0967475717

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS “LA ALGODONERA” Y “ATUNTAQUI” DE SERMAA EP
AUTOR (ES):	Kenneth Jair Quilumba España
FECHA: AAAAMMDD	2026/03/27
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
PROGRAMA	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES
DIRECTOR:	Paúl Michael Tafur Escanta

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Kenneth Jair Quilumba España, con cédula de identidad Nro. 1750342568, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o Trabajo de Integración Curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 27 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Kenneth Jair Quilumba España

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Kenneth Jair Quilumba España

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 27 de marzo de 2026

Ing. Paúl Michael Tafur PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

Ing. Paúl Michael Tafur PhD.

C.C.: 1003867353

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular “EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS “LA ALGODONERA” Y “ATUNTAQUI” DE SERMAA EP” elaborado por Quilumba España Kenneth Jair, previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

TUTOR: Ing. Paúl Michael Tafur PhD.

C.C.: 1003867353

(f):.....

ASESOR: Ing. Oscar Rosales Msc.

C.C.:0400933529

(f):.....

BIOMETRISTA Ing. Juan Carlos García PhD.

C.C.: 1002279535

DEDICATORIA

Primero agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza en los momentos difíciles. En cada etapa de mi formación sentí su presencia, que me brindó perseverancia, sabiduría y consuelo para lograr esta meta.

Dedico esta tesis especialmente a mi madre, Ilda España. Quien ha sido mi mayor apoyo e inspiración, su amor y ejemplo de lucha son el motor que me impulso y me permitió obtener este logro académico, siempre me enseñó a no rendirme y hacerle frente a los problemas, la admiro con todo mi ser y la amo con todo mi corazón, le entrego este logro con mucho cariño.

Igualmente, dedico este trabajo a Karla Quilumba, mi hermana y una de las razones que me motivan a superarme y uno de los mayores orgullos de mi vida. Por último, agradezco de manera sincera a mi familia Pérez España Vásquez, quienes me han brindado su apoyo incondicional, cariño y confianza durante todo este proceso que fue muy duro, pero gracias a cada uno de ustedes pude lograrlo.

AGRADECIMIENTO

Estoy profundamente agradecido con el PhD. Paul Tafur, quien ha sido un apoyo maravilloso durante todo el proceso de mi tesis. Me ha brindado muchísimos beneficios desde su increíble dedicación y compromiso hasta su arduo trabajo, aprecio sinceramente todo lo que ha hecho. También le agradezco al PhD Paul. Tafur, su confianza en mí y por todo el apoyo tanto académico como moral que me brindo durante todo mi periodo académico y durante la elaboración de mi TIC.

De igual manera, extendiendo mi agradecimiento al MSc. Oscar Rosales, por toda su paciencia. Su ayuda ha sido de suma importancia para este trabajo, quedo eternamente agradecido por siempre estar predispuesto a ayudarme y explicarme todo de la mejor forma.

Quiero agradecer a la empresa SERMAA EP por abrirme las puertas de sus instalaciones para poder realizar mis prácticas, que fueron de gran ayuda para poder recopilar datos y realizar este trabajo de mejor forma.

A todos ustedes les agradezco y reconozco su papel como parte fundamental de este logro académico.

RESUMEN

Se realizó un estudio en las centrales hidroeléctricas “La Algodonera y Atuntaqui”. Estas centrales son parte de la empresa pública SERMAA EP. Están ubicados en la cuenca del río Ambi, en el cantón Antonio Ante, en la provincia de Imbabura. La zona donde se encuentran estas centrales tiene un clima templado. El terreno es montañoso, con cerros y valles, es una zona agrícola y ganadera.

El estudio nos permitió determinar la cantidad de agua disponible para la generación de las centrales hidroeléctricas. Hemos empleado una perspectiva firme para lograr estos objetivos, que comprendía la delineación de la cuenca utilizando SIG, el análisis de datos climáticos y del flujo de agua a lo largo del tiempo, así como la realización de trabajos prácticos con el modelado y molienda del agua mediante instrumentos tales como HEC-HMS y SWAT. y calor de sitios como NASA POWER, INAMHI y RNEL. Realizamos algunas pruebas para determinar si todo estaba en orden, si había alguna relación entre ellos y cuál era la relación entre ellos a través de una línea recta.

Se observó una gran variación en los flujos estacionales y anuales del río Ambi, entre 1,16 m³/s en la estación seca (agosto) y 6,82 m³/s en la estación lluviosa (abril). Los modelos predictivos desarrollados permitieron estimar caudales futuros en el rango de 1,03 m³/s a 9,62 m³/s. La generación anual podría aumentar alrededor del 20 %, encontrándose en los alrededores de 9,0 GWh, asegurando al mismo tiempo la sostenibilidad ambiental mediante la comprobación de caudales ecológicos mínimos de 0,471 m³/s en la estación seca y 1,413 m³/s en la estación lluviosa, los cuales garantizan la preservación del ecosistema.

Palabras clave: Hidrología, centrales hidroeléctricas, caudal ecológico, cuenca del río Ambi, modelación hidrológica, energía renovable, variabilidad climática, aforo de caudales y gestión sostenible del recurso hídrico.

ABSTRACT

This study was conducted at the “La Algodonera” and “Atuntaqui” hydroelectric plants, owned by the public company SERMAA EP, located in the Ambi River basin in the Antonio Ante canton of Imbabura province. This area is characterized by a semi-humid mesothermal climate, Andean topography, and predominantly agricultural land use. The principal aim of the study was to assess the attainable water potential for power generation at these stations.

We used a strict methodology to accomplish this: the GIS was used to define the basin, and then the climate data and water flow were analysed over time, in addition to doing fieldwork using water modelling and flow analysis tools, such as HEC-HMS and SWAT. We also included heating data from sources like NASA POWER, INAMHI, and RNEL into this analysis. We performed tests to determine if everything was in order, if there were any relationships between the data, and if so, what those relationships were, as expressed in a straight line.

Ambi River shows strong seasonal flow variations from 1.16 m³/s in the dry (August) to 6.82 m³/s in the rainy season (April). In the future, river flows are expected to vary between 1.03 m³/s and 9.62 m³/s. It is estimated that annual electricity generation will increase by about 20% to 9.0 GWh. At the same time, the minimum ecological flow of 0.471 m³/s for dry season and 1.413 m³/s for wet season will also be maintained for ecosystem protection.

Keywords: Hydrology, Hydroelectric power plants, Ecological flow, Ambi River basin, Hydrological modeling, Renewable energy, Climate variability, Flow gauging, Sustainable water management.

LISTA DE SIGLAS

SERMAA EP – Servicios Municipales Autónomos de Atuntaqui Empresa Pública

SIG – Sistema de Información Geográfica

DEM – Modelo Digital de Elevación

INAMHI – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

NASA – National Aeronautics and Space Administration

POWER – Prediction of Worldwide Energy Resource

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System

WEAP – Water Evaluation and Planning System

NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency

PBIAS – Percent Bias

OLS – Ordinary Least Squares

LSTM- Long Short-Term Memory

ARIMA- AutoRegressive Integrated Moving Average

SVM- Support Vector Machine

Índice de Contenidos

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de Investigación	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos	4
<i>1.3.1 Objetivo General</i>	4
<i>1.3.2 Objetivo Específicos</i>	4
1.4 Pregunta Directriz	5
1.5 Hipótesis.....	5
<i>1.5.1 Hipótesis Nula (Ho)</i>	5
<i>1.5.2 Hipótesis Alternativa (Ha)</i>	5
CAPÍTULO I	6
Marco Teórico.....	6
1.1. Hidrología y generación hidroeléctrica	6
1.2 Caudal ecológico	7
1.3 Modelos y herramientas para el análisis hidrológico	7
<i>1.3.1 SWAT (Soil Water Assessment Tool)</i>	7
<i>1.3.2 Indicadores IHA/IIHA</i>	8
<i>1.3.3 Métodos de frecuencia y caudales de diseño</i>	8
<i>1.3.4 Balance de masas</i>	9
1.4. Mapas hídricos e hidrológicos.....	9
1.5. Operaciones de embalses y cambio climático	11

1.5.1	<i>Altura de embalses y su influencia en la regulación de caudales</i>	11
1.5.2	<i>Influencia de la elevación de los embalses en la eficacia de producción hidroeléctrica</i>	11
1.6	Criterios de predicción y modelos LSTM en hidrología	12
1.6.1	<i>Optimización de hiperparámetros en LSTM mediante algoritmos evolutivos</i>	13
1.6.2	<i>Predicción de caudales y crecidas con LSTM optimizadas con algoritmos genéticos</i>	14
CAPÍTULO II		15
MATERIALES Y MÉTODOS		15
2.1	Área de estudio	16
2.2	Métodos	17
2.2.1	<i>Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Ambi</i>	17
2.2.2	<i>Recolección y análisis de información hidrometeorológica</i>	18
2.2.3	<i>Climatología</i>	18
2.3	Registro histórico y actualización de mediciones de caudal	20
2.4	Análisis gráfico de tendencias de caudales máximos	21
2.4.1	<i>Determinación de los caudales máximos anuales y mensuales disponibles en el río Ambi</i>	21
2.5	Simulación hidrológica y modelación de escenarios	22
2.6	Incorporación de modelos LSTM y optimización evolutiva en la predicción hidrológica	23

2.7 Materiales, instrumentos y software.....	24
CAPÍTULO III.....	26
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	26
3.1 Análisis climatológico de la cuenca del río Ambi	26
3.1.1 Distribución espacial de la precipitación	26
3.1.2 Balance hídrico mensual.....	27
3.1.3 Precipitación anual y comportamiento hidrológico	28
3.1.4 Tendencia y variabilidad climática.....	30
3.2 Variación mensual del caudal y estacionalidad.....	31
3.3 Análisis de la curva de duración de caudales y determinación de caudales característicos.....	35
3.3.1 Curva de duración de caudales.....	35
3.3.2 Determinación de los caudales característicos Q_{20} , Q_{50} y Q_{95}	36
3.4 Determinación del caudal de diseño.....	37
3.4.1 Criterio de selección del caudal de diseño	37
3.4.2 Caudal de diseño adoptado.....	38
3.4.3 Análisis del caudal de diseño en relación con la disponibilidad hídrica	38
3.4.4 Relación del caudal de diseño con la altura neta y las pérdidas hidráulicas.....	38
3.5 Análisis del caudal ecológico.....	39
3.5.1 Método de Tennant.....	39
3.6 Determinación del caudal aprovechable	41
3.7 Potencia y energía generada.....	41

3.7.1 Cálculo de la potencia hidroeléctrica	41
3.7.2 Estimación de la energía generada.....	42
3.7.3 Variación mensual de la potencia y energía hidroeléctrica	42
3.7.4 Variación anual de la potencia y energía hidroeléctrica.....	43
3.8 Análisis y predicción de la serie temporal de caudales.....	44
3.8.1 Descomposición de la serie temporal	44
3.8.2 Análisis de autocorrelación.....	45
3.8.3 Predicción de la serie de caudales.....	47
3.8.2 Determinación del caudal ecológico predicho	49
3.8.3 Caudal aprovechable bajo condiciones futuras.....	51
3.8.4 Proyección mensual de la potencia y energía hidroeléctrica	51
3.8.5 Estimación de la energía anual generada.....	52
3.9 Discusión de Resultados.....	53
CAPÍTULO IV.....	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
4.1 Conclusión.....	55
4.2 Recomendaciones.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXOS	63

Índice de Tablas

Tabla 1 Datos meteorológicos históricos	19
Tabla 2 Herramientas e instrumentos aplicados en el estudio hidrológico.....	24
Tabla 3 Balance hídrico mensual de la cuenca del río Ambi.....	27
Tabla 4 Datos meteorológicos históricos	29
Tabla 5 Caudal medio mensual promedio del río Ambi	33
Tabla 6 Caudales característicos	36
Tabla 7 Caudal ecológico según método de Tennant	40
Tabla 8 Predicción mensual de caudales del río Ambi.	48
Tabla 9 Caudal ecológico predicho según método de Tennant	50

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema de una central hidroeléctrica	6
Figura 2 Mapa de zonas de importancia hídrica en Ecuador.....	10
Figura 3 Ubicación de la cuenca del río Ambi, Ecuador y las hidroeléctricas “La Algodonera y "Atuntaqui" de SERMAA EP	16
Figura 4 Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológicas del río Ambi ..	17
Figura 5 Distribución de la precipitación de la Estación Ambi DJ Cariyacu	18
Figura 6 Diagrama ombrotérmico.....	19
Figura 7 Histograma de caudales.....	20
Figura 8 Tendencia mensual del caudal en el río Ambi	21
Figura 9 Disponibilidad del recurso hídrico en el punto de captación	23
Figura 10 Distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca del río Ambi	26

Figura 11 Variación mensual del balance hídrico en la cuenca del río Ambi.	28
Figura 12 Distribución anual de la precipitación- temperatura	30
Figura 13 Tendencia de la precipitación anual	31
Figura 14 Distribución espacial de los caudales medios mensuales en la cuenca del río Ambi.	32
Figura 15 Régimen hidrológico mensual promedio del río Ambi	34
Figura 16 Curva de duración de caudales del río Ambi	35
Figura 17 Comparación entre el caudal medio mensual y el caudal ecológico	40
Figura 18 Variación mensual de la potencia y energía generada	42
Figura 19 Variación anual de la potencia y energía generada	44
Figura 20 Descomposición de la serie temporal de caudales.	45
Figura 21 Función de autocorrelación de la serie de caudales	46
Figura 22 Pronóstico de la serie temporal de caudales.	47
Figura 23 Predicción mensual de caudales	48
Figura 24 Variación mensual del caudal medio predicho y del caudal ecológico.....	50
Figura 25 Variación mensual de la potencia y energía hidroeléctrica predicha	51

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

El cambio climático ha generado alteraciones significativas en los patrones de precipitación, afectando tanto la cantidad como la distribución temporal del agua disponible. (Veneros et al., 2025). No contar con una base de datos hidrológica actualizada y representativa dificulta la gestión de los recursos hídricos.

Una porción considerable de la información acerca de los caudales de sistemas hidrográficos y ríos no se actualiza con la frecuencia necesaria para reflejar cambios recientes en los regímenes hidrológicos. Esta falta de datos dificulta el funcionamiento de las hidroeléctricas y la planificación sostenible de las infraestructuras hidráulicas, así como también hacer valoraciones exactas sobre la garantía del caudal ecológico. No se pueden prever situaciones críticas ni formular estrategias de gestión adaptativas frente a contextos cambiantes que enfrentan desafíos operativos permanentes, sobre todo a causa de la imprevisibilidad de los caudales, si no se dispone de datos confiables y actuales (Chen et al., 2025).

En regiones donde las infraestructuras están muy deterioradas, las centrales hidroeléctricas disponen de equipos envejecidos, y en las actividades rutinarias de mantenimiento hay recurrentes deficiencias. Esta condición conduce a la erosión de componentes clave, como conductos forzados, turbinas, y sistemas de compuertas, y compromete la operación general del establecimiento. La falta de convenientes programas de mantenimiento disminuye la eficiencia operativa y aumenta la posibilidad de fallas, particularmente por sedimentación, obstrucción y daño mecánico no atendido. Como consecuencia, se ve afectada la confiabilidad del suministro eléctrico y se generan pérdidas económicas asociadas a la disminución en la producción energética. Asimismo, aquellas centrales que no cuentan con inversiones continuas de capital presentan mayores dificultades

para mantenerse competitivas y resultan más vulnerables frente a eventos climáticos extremos.(Afrontar La Escasez de Agua: Un Marco de Acción Para La Agricultura y La Seguridad Alimentaria, 2013).

Además, los problemas relacionados con la disponibilidad e integridad de los datos se ven agravados por la falta de mantenimiento, modernización y expansión de la red de monitoreo hidrometeorológico. La red actual solo confirma los eventos de lluvia a medida que ocurren y carece de un sistema de alerta que proporcione suficiente aviso anticipado a un operador de planta eléctrica para que pueda tomar decisiones informadas basadas en un pronóstico de caudal a largo plazo. Sin un sistema de monitoreo automatizado y en tiempo real, el Gobierno Federal no puede responder eficazmente a eventos de lluvia extrema, lo que resulta en una utilización ineficiente de los recursos y la pérdida de oportunidades de beneficio económico asociadas con el trabajo relacionado con la generación de electricidad a partir del otro volumen de agua actualmente no disponible debido a que la generación de electricidad no cumple con los estándares establecidos (Campo & Boada, 2019).

Desde un punto de vista operativo, el modelo actual de gestión del embalse no permite prever con la precisión necesaria los acontecimientos hidrológicos críticos. Como resultado, se han puesto en marcha estrategias reactivas en vez de preventivas. Es necesaria una planificación hidrotécnica exacta para operar el embalse de regulación diaria y diseñar las centrales como plantas de pasada, ya que el agua que no puede ser turbina o almacenada en el embalse se vierte sin producir energía, lo cual supone una importante pérdida energética. En efecto, se calcula que, si el desecho se pudiera reducir a la mitad, la producción de energía de las plantas podría aumentar cerca del 20%, lo que significaría una ganancia económica significativa para la empresa eléctrica encargada de su funcionamiento (Campos et al., 2016).

1.2 Justificación

El estudio hidrológico de las centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui” responde a una necesidad crítica de garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en un contexto de creciente presión por parte del cambio climático y las actividades humanas. La producción de energía limpia a partir del agua es una línea estratégica para atender los compromisos en materia ambiental y derechos humanos que ha asumido Ecuador de acuerdo con su Constitución y los ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

En el derecho ecuatoriano, la Constitución de 2008 reconoce el agua como un derecho fundamental y dispone que los ecosistemas son sujetos de este derecho (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008). Este planteamiento determina que toda actividad que utilice el recurso agua, entre la que se engloba la generación hidroeléctrica, debe ser considerada de forma global bajo criterios de sostenibilidad, preservando el equilibrio natural de los cuerpos de agua y asegurando la protección de los caudales ecológicos.

Una operación inadecuada de las centrales hidroeléctricas puede causar cambios drásticos en las condiciones naturales de los ríos, y por tanto en la dinámica hidrológica y con ella en las actividades propias de los procesos ecológicos asociados a ellos. Esto puede tener repercusiones negativas sobre la biodiversidad acuática y limitar el acceso al agua para otros propósitos, según han demostrado varios estudios científicos (Bianucci et al., 2024; Chen, Zhang, et al., 2025). Por lo tanto, diseñar caudales ecológicos que se ajusten a diversos periodos hidrológicos es una herramienta esencial para garantizar que los ríos sean resilientes ante las modificaciones climáticas y antrópicas.

Asimismo, el cambio climático introduce un nivel adicional de incertidumbre sobre la disponibilidad futura de agua. Los patrones de precipitación y temperatura están modificando el balance hídrico de manera significativa, afectando directamente la viabilidad operativa de

las centrales hidroeléctricas (Hariadi et al., 2024; Wang et al., 2024). Este panorama evidencia la necesidad de incluir modelos hidrológicos avanzados, como los de restauración de caudal y balance hídrico, con el fin de gestionar los recursos adaptativamente. (Campos et al., 2016).

Finalmente, la realización de estudios hidrológicos precisos en iniciativas como las de SERMAA EP no solo permitirá optimizar la producción de energía renovable, sino que también contribuirá a cumplir con las regulaciones ambientales tanto locales como extranjeras, lo cual beneficiará a las generaciones presentes y futuras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el potencial hídrico de las centrales hidroeléctricas “LA ALGODONERA” Y “ATUNTAQUI” DE SERMAA EP como base para la planificación y mejora continua de la generación energética eficiente.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Analizar la distribución de caudales máximos y medios, anuales y mensuales disponibles en el río Ambi que incide en el sistema de distribución destinando a la generación de hidroenergía.
- Determinar la variabilidad del caudal ecológico en las estaciones seca y lluviosa con la finalidad de garantizar el funcionamiento y generación optima de las centrales hidroeléctricas.
- Evaluar los escenarios hidrológicos en la cuenca hidrográfica que abastecen a las centrales hidroeléctricas.

1.4 Pregunta Directriz

¿Cuál es el potencial hídrico actual de las centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui” de SERMAA EP y cómo puede optimizarse para mejorar la eficiencia en la generación energética y la planificación futura?

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis Nula (Ho)

Los caudales, las variables ambientales de la cuenca hidrográfica del río Ambi, y los diferentes escenarios hidrológicos no presentan diferencias significativas en la producción energética, operación y rendimiento de las centrales hidroeléctricas "La Algodonera" y "Atuntaqui" de SERMAA EP.

1.5.2 Hipótesis Alternativa (Ha)

Los caudales, las variables ambientales de la cuenca hidrográfica del río Ambi, y los diferentes escenarios hidrológicos presentan diferencias significativas en la producción energética, operación y rendimiento de las centrales hidroeléctricas "La Algodonera" y "Atuntaqui" de SERMAA EP.

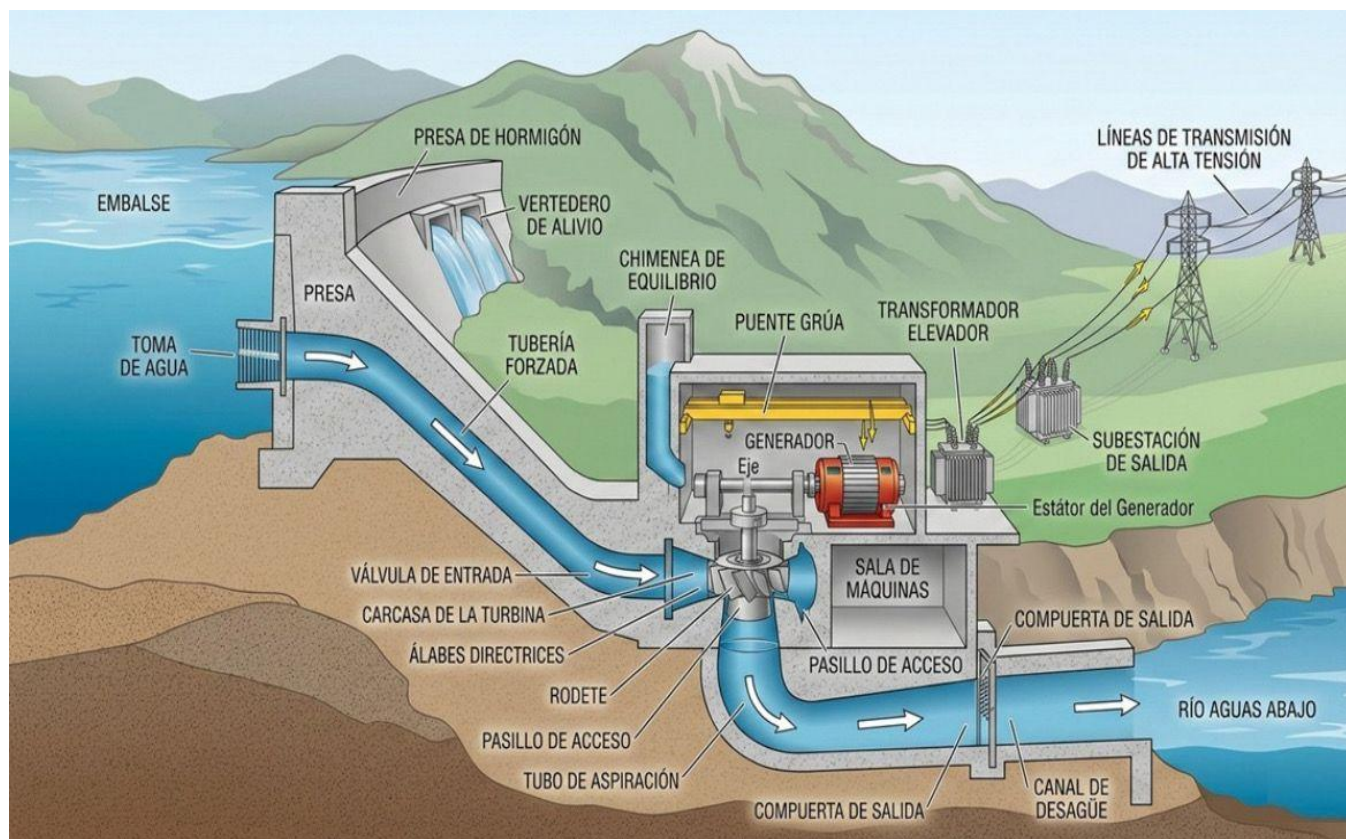
CAPÍTULO I

Marco Teórico

1.1. Hidrología y generación hidroeléctrica

Las centrales hidroeléctricas son una de las fuentes de energía renovable más importantes del mundo, aunque su operación depende en gran medida de los estados hidrológicos de las cuencas donde se encuentran (Kuriqi et al., 2019). El estudio de los patrones de caudal de los ríos y su evolución ante diversas presiones ambientales resulta indispensable para la planificación, diseño y operación de proyectos hidroeléctricos sostenibles. La comprensión de estos patrones permite anticipar los impactos que pueden tener el cambio climático y otras actividades humanas sobre la disponibilidad hídrica y la estabilidad de los ecosistemas acuáticos (Ly et al., 2023) (Figura 1).

Figura 1
Esquema de una central hidroeléctrica



1.2 Caudal ecológico

El caudal ecológico representa la cantidad, calidad y patrones temporales de caudal necesarios para mantener la estructura, función y servicios de los ecosistemas acuáticos. Garantizar caudales ecológicos es esencial para preservar la biodiversidad, conectividad longitudinal y procesos críticos en ríos regulados por embalses, una fórmula común para estimar caudales ecológicos es la siguiente (Ecuación 1) (Acreman, 2014).

$$Q_e = \alpha \cdot Q_{med} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

Q_e : Caudal ecológico o caudal mínimo ambiental (m³/s)

α : Coeficiente de proporción

Q_e : Caudal medio anual del río (m³/s)

1.3 Modelos y herramientas para el análisis hidrológico

1.3.1 SWAT (*Soil Water Assessment Tool*)

El modelo SWAT permite simular la dinámica hidrológica de una cuenca considerando precipitación, temperatura, evapotranspiración, escorrentía, uso de suelo, cobertura vegetal, operación de embalses y liberación de caudales.

SWAT integra información espacial y temporal de la cuenca para generar series de caudales diarios, lo que facilita estimar caudales ecológicos, caudales máximos y mínimos, y evaluar escenarios climáticos futuros, utilizado para simular dinámica hidrológica de cuencas. (Neitsch et al., 2011).

1.3.2 Indicadores IHA/IIHA

La metodología IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) es ampliamente utilizada para evaluar cambios en los regímenes de flujo propusieron indicadores mejorados de alteración hidrológica (IIHA) para cuantificar los impactos inducidos por embalses en ríos de tamaño pequeño y mediano. Estos indicadores permiten una evaluación más precisa de las alteraciones en los regímenes de flujo, considerando diferencias intra-anales que son relevantes en ríos de menor tamaño (Fang et al., 2023).

1.3.3 Métodos de frecuencia y caudales de diseño

El análisis de frecuencia hidrológica permite estimar caudales extremos asociados a diferentes períodos de retorno, fundamentales para el dimensionamiento de obras hidráulicas como puentes, vertederos y centrales hidroeléctricas. Uno de los métodos más utilizados para este fin es la Distribución de Gumbel o Tipo I de Valores Extremos, recomendada para el análisis de máximos anuales de caudal.

La distribución de Gumbel permite estimar el caudal de diseño mediante la siguiente fórmula (Ecuación 2).

$$Q_T = \bar{Q}_{max} + K_T \cdot S_Q \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

Q_T : Caudal de diseño para un período de retorno T (m³/s)

$\bar{Q}_{max}$: Media de caudales máximos anuales (m³/s)

K_T : Factor de frecuencia en función del período de retorno

S_Q : Desviación estándar de los caudales máximos (m³/s)

Según (Anghel, 2024), la distribución de Gumbel es ampliamente utilizada debido a su sencillez matemática y facilidad para estimar valores extremos.

La distribución de Gumbel es apropiada para el presente estudio debido a que permite estimar caudales máximos de diseño con base estadística y es recomendada en estudios hidrológicos similares (Anghel, 2024; Temtime, 2024)

1.3.4 Balance de masas

El balance hídrico en una cuenca es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos, ya que permite estimar el volumen de agua disponible para diversos usos. Una forma simplificada de calcular el volumen anual de precipitación en una cuenca es la siguiente (Ecuación 3).

$$V = 100 \cdot \bar{P} \cdot A \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

V : Volumen anual de precipitación (m^3)

$\bar{P}$: Precipitación media anual (mm)

A : Área de la cuenca (km^2)

Esta fórmula supone que la precipitación se distribuye de manera uniforme sobre toda el área de la cuenca, lo cual es una aproximación válida en estudios preliminares cuando no se dispone de datos espaciales detallados (Davul, 2023)

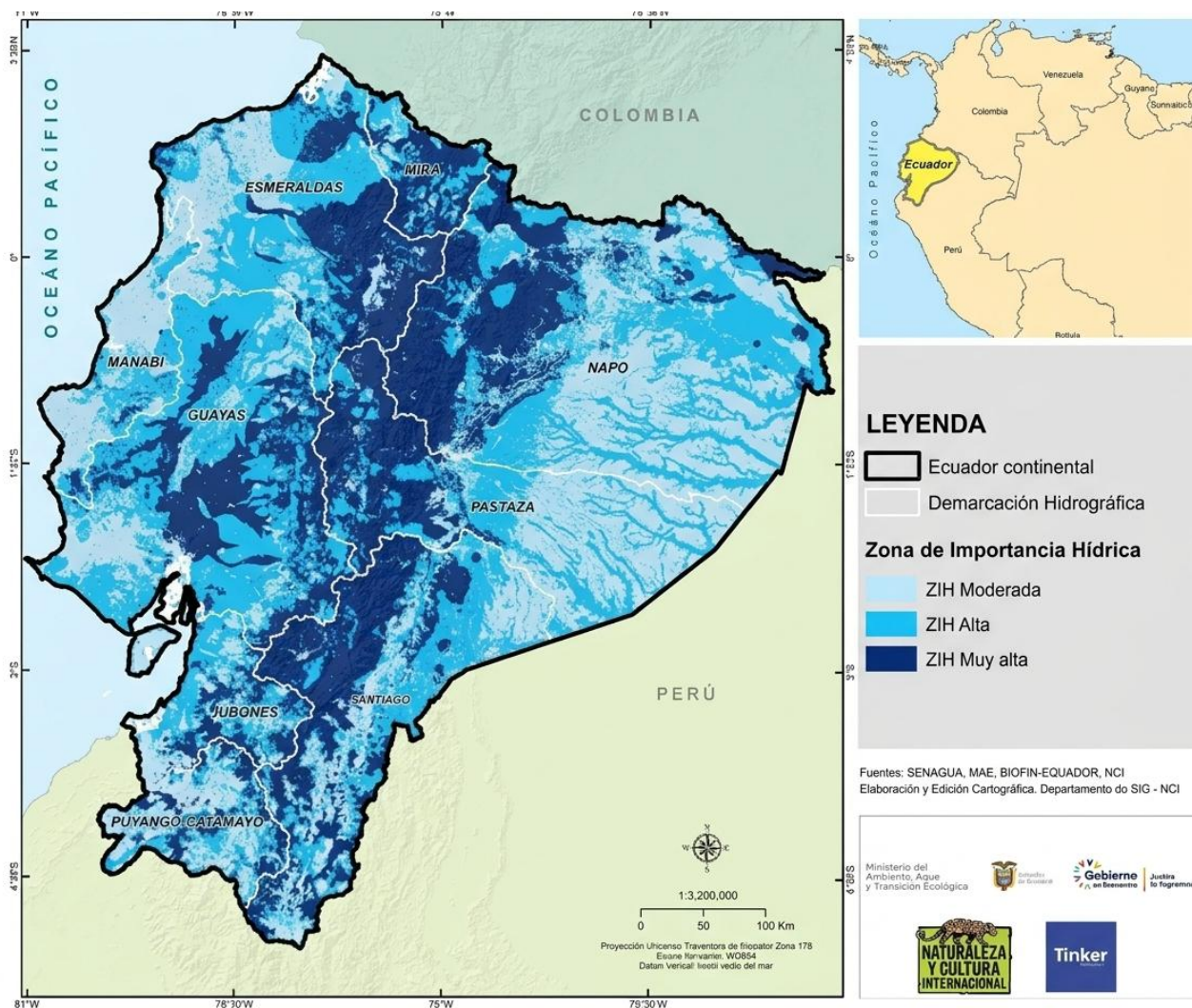
1.4. Mapas hídricos e hidrológicos

Los mapas hídricos e hidrológicos son herramientas fundamentales para la gestión sostenible de los recursos hídricos, la planificación territorial y la adaptación al cambio climático en Ecuador. Permiten representar y analizar la distribución espacial de variables hidrológicas clave, como la red de drenaje, las cuencas hidrográficas, los puntos de control hidrométrico, el caudal medio y los períodos de máxima avenida. Su integración con Sistemas

de Información Geográfica (SIG) facilita la planificación, modelización y conservación de los recursos hídricos (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2024) (Figura 2).

Figura 2

Mapa de zonas de importancia hídrica en Ecuador



Además, la integración de SIG con modelos hidrológicos ha sido aplicada en varias cuencas del país. Por ejemplo, en la cuenca del río Jipijapa, provincia de Manabí, se implementó un modelo hidrológico que permitió simular el comportamiento hidrológico de la cuenca, facilitando la toma de decisiones en la gestión del agua y en la planificación territorial (Bello Vera, 2024).

1.5. Operaciones de embalses y cambio climático

Las operaciones de embalses alteran significativamente el régimen de flujo de los ríos, a menudo más que el cambio climático directo en horizontes intermedios. La combinación de ambos factores produce efectos sinérgicos sobre la magnitud, frecuencia y sincronización de caudales críticos. Las centrales hidroeléctricas deben considerar estos cambios en sus estrategias de seguridad hídrica y energética (Maskey, 2022), la interacción entre las operaciones de embalses y el cambio climático puede modificar los patrones de caudales, afectando la disponibilidad de agua para generación eléctrica y aumentando el riesgo de eventos extremos como inundaciones o sequías.

1.5.1 Altura de embalses y su influencia en la regulación de caudales

La altura de embalses es un parámetro crítico que influye en la capacidad de almacenamiento, regulación de caudales y seguridad estructural. La altura máxima y la elevación de operación determinan el grado de alteración del flujo aguas abajo, así como la eficacia de generación, según investigaciones recientes. La capacidad de almacenamiento y regulación puede aumentar con el aumento de la altura de los embalses, pero también se eleva el peligro de que ocurran desbordamientos y daños estructurales si hay fenómenos climáticos severos. (He, 2024).

1.5.2 Influencia de la elevación de los embalses en la eficacia de producción hidroeléctrica

El salto hidráulico o altura del embalse (head) en una central hidroeléctrica se define como la diferencia de elevación entre el nivel del agua en la estructura de toma y el nivel de descarga, descontando las pérdidas hidráulicas por fricción y turbulencia. Representa la energía potencial disponible por unidad de peso del agua que puede transformarse en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica (Banerjee, 2016).

La altura efectiva condiciona la selección del tipo de turbina siendo las Kaplan más adecuadas para cabezas bajas y las Francis o Pelton para cabezas medias y altas y tiene un efecto directo sobre la eficiencia global del sistema, ya que las variaciones del nivel del embalse alteran el salto neto y pueden reducir la potencia real disponible (Ceran et al., 2020).

El análisis del head no solo es técnico, sino también ambiental y operativo, dado que un mayor embalse puede implicar mayor área inundada, pérdidas por evaporación y modificaciones hidrológicas que deben considerarse en la optimización del rendimiento energético y la sostenibilidad del proyecto hidroeléctrico. La potencia teórica generada por una central hidroeléctrica se expresa de la siguiente forma (Ecuación 4).

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

P : Potencia Eléctrica útil (W)

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

Q : Caudal volumétrico de agua que atraviesa la turbina (m³/s)

H : Salto neto o altura hidráulica efectiva (m)

η : Eficiencia

1.6 Criterios de predicción y modelos LSTM en hidrología

En los últimos años, los modelos de inteligencia artificial han transformado el análisis y la predicción hidrológica, especialmente mediante redes neuronales recurrentes como las Long Short-Term Memory (LSTM), las cuales son capaces de modelar la dinámica no lineal y la memoria temporal de las series de caudales. Las LSTM han demostrado una notable

capacidad para capturar patrones hidrológicos complejos y mejorar la precisión de los pronósticos a múltiples pasos, superando a modelos tradicionales como ARIMA o SVM en la predicción de caudales y escurrimiento. Además, los autores subrayan la importancia de calibrar los hiperparámetros de la red para alcanzar un rendimiento óptimo en diferentes cuencas y condiciones hidrometeorológicas (Guo et al., 2020).

1.6.1 Optimización de hiperparámetros en LSTM mediante algoritmos evolutivos

La calibración de los modelos LSTM puede realizarse de forma más eficiente utilizando algoritmos evolutivos, los cuales permiten optimizar simultáneamente múltiples objetivos, como la minimización del error cuadrático medio (RMSE) y la maximización del coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE). Lo que propone una metodología innovadora basada en la optimización de redes LSTM y GRU mediante el algoritmo genético multiobjetivo no dominado (NSGA-II), demostrando mejoras significativas en la predicción a corto plazo de series hidrológicas. Los resultados demuestran que el método NSGA-II logra un equilibrio efectivo entre la generalización y la precisión del modelo. (Deka et al., 2024).

En la predicción hidrológica, el algoritmo NSGA-II se ha comparado con otros como MOEA/D y NSGA-III, y ha mostrado ser competitivo y estable. Los algoritmos de múltiples objetivos ayudan a mejorar la predicción subdiaria de escurrimiento, ya que permiten encontrar un mejor equilibrio entre la precisión del modelo y el tiempo de cómputo. Aunque NSGA-III puede tener algunas ventajas cuando hay más de tres objetivos, NSGA-II sigue siendo el más robusto y el que cuenta con mayor documentación para problemas de predicción de caudales. (Jia et al., 2024)

1.6.2 Predicción de caudales y crecidas con LSTM optimizadas con algoritmos genéticos

Los estudios recientes combinan la potencia de las redes neuronales LSTM con técnicas evolutivas y modelos físicos para mejorar la predicción de eventos hidrológicos extremos. Se fusionan modelos físicos con inteligencia artificial, y se evidencia que la implementación de procesos hidrodinámicos simulados en redes neuronales aumenta la habilidad para predecir inundaciones repentinas. Esta perspectiva mixta, que se mejora a través de algoritmos evolutivos, fortalece el modelo frente a la variabilidad en términos hidrológicos y disminuye los errores relacionados con los picos de caudal (Li et al., 2024).

Los resultados alentadores que se han obtenido al utilizar algoritmos genéticos para optimizar las LSTM en la predicción de crecidas repentinas son notables. En investigaciones recientes, se aplicaron algoritmos genéticos clásicos y variantes multiobjetivo para ajustar automáticamente los hiperparámetros de la red, mejorando la detección temprana de picos de caudal. Este enfoque permite reducir errores en la predicción de eventos extremos, un aspecto crítico en la gestión del riesgo hídrico (Jhong et al., 2024)

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo detalla la metodología que se empleó para la caracterización hidrológica, climatológica y operativa de las centrales hidroeléctricas municipales de SERMAA EP, ubicadas en el sector de Ontañón, cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura. Se describió el procedimiento para la identificación y evaluación de las estructuras principales de captación y conducción del recurso hídrico, tales como la bocatoma, el desarenador y la cámara de presión. Asimismo, se presentó el análisis del régimen climático, el cual se realizó a partir de datos históricos de precipitación, temperatura y humedad relativa correspondientes al periodo 2010-2025, obtenidos de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI): AMBI – DJ Cariyacu (H0023), M315, M326, M105, M0001 y M107C. La estación AMBI – DJ Cariyacu (H0023) fue tomada como referencia por encontrarse directamente en la cuenca del río Ambi y por reflejar de manera más estructurada las condiciones hidrometeorológicas del lugar. Sin embargo, por la falta de registros hasta el año 2015, la información faltante se complementó con la información correlacionada de las demás estaciones cercanas para completar las series climáticas y asegurar su continuidad y representatividad.

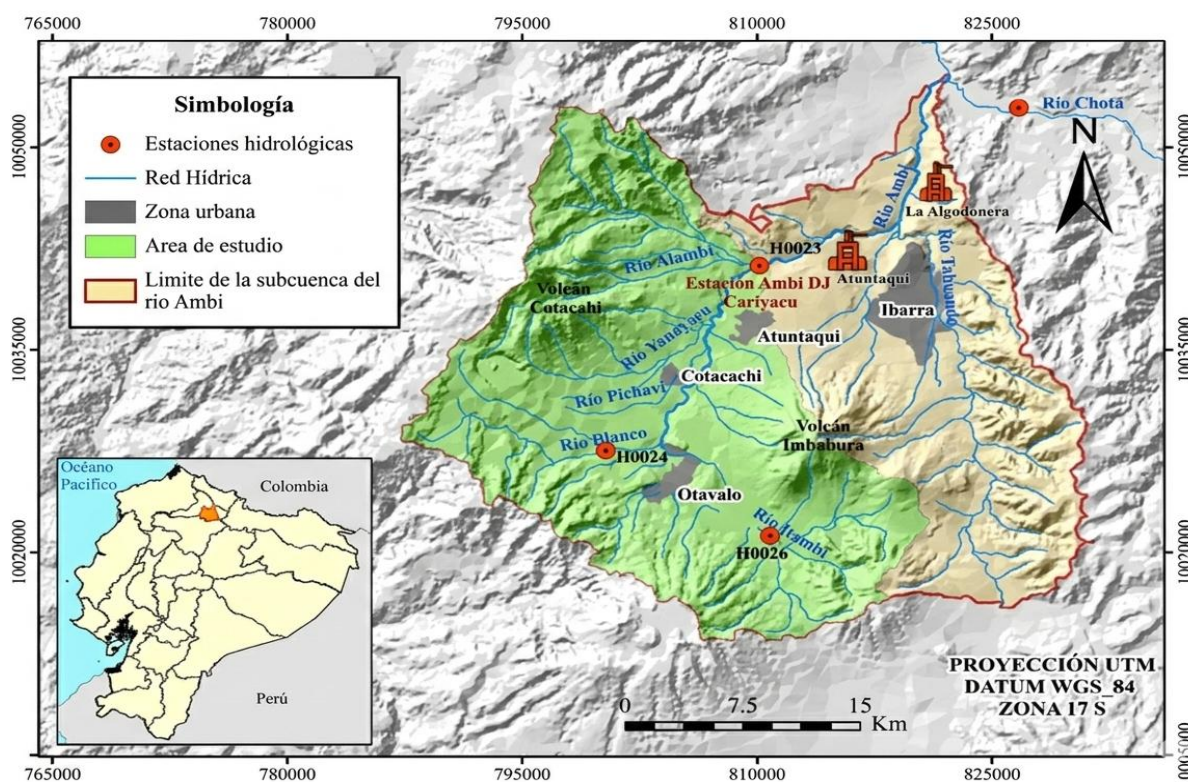
Sobre el régimen hidrológico, se describió la forma de medición y registro de caudales por métodos manuales y volumétricos, así como la elaboración de tablas de aforos en canales y estructuras de conducción. Finalmente, se listan los materiales e instrumentos para la toma de datos topográficos e hidrológicos, que permitió realizar el análisis técnico y el diagnóstico integral de la operación de las centrales hidroeléctricas

2.1 Área de estudio

Las centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui” se localizan en el sector Ontaño, junto al río Ambi, en el cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura, Ecuador. Sus componentes principales, como la bocatoma y el desarenador, se encuentran a aproximadamente 2 205 m y 2 287 m s.n.m., respectivamente. Las coordenadas aproximadas son 0.33247° N, -78.21371° O. El clima es de tipo ecuatorial mesotérmico semi-húmedo de los Andes medios. La temperatura media anual de Atuntaqui oscila entre 15 °C y 22 °C, otorgando a la ciudad un clima templado típico andino (WeatherSpark, 2024). El régimen lluvioso es estacional bien definido con un período lluvioso que va entre los meses de mayo y octubre (Figura 3).

Figura 3

Ubicación de la cuenca del río Ambi, Ecuador y las hidroeléctricas “La Algodonera y “Atuntaqui” de SERMAA EP



(Vista de Índice de Escasez Hídrica En La Cuenca Del Río Ambi, Ecuador, 2025)

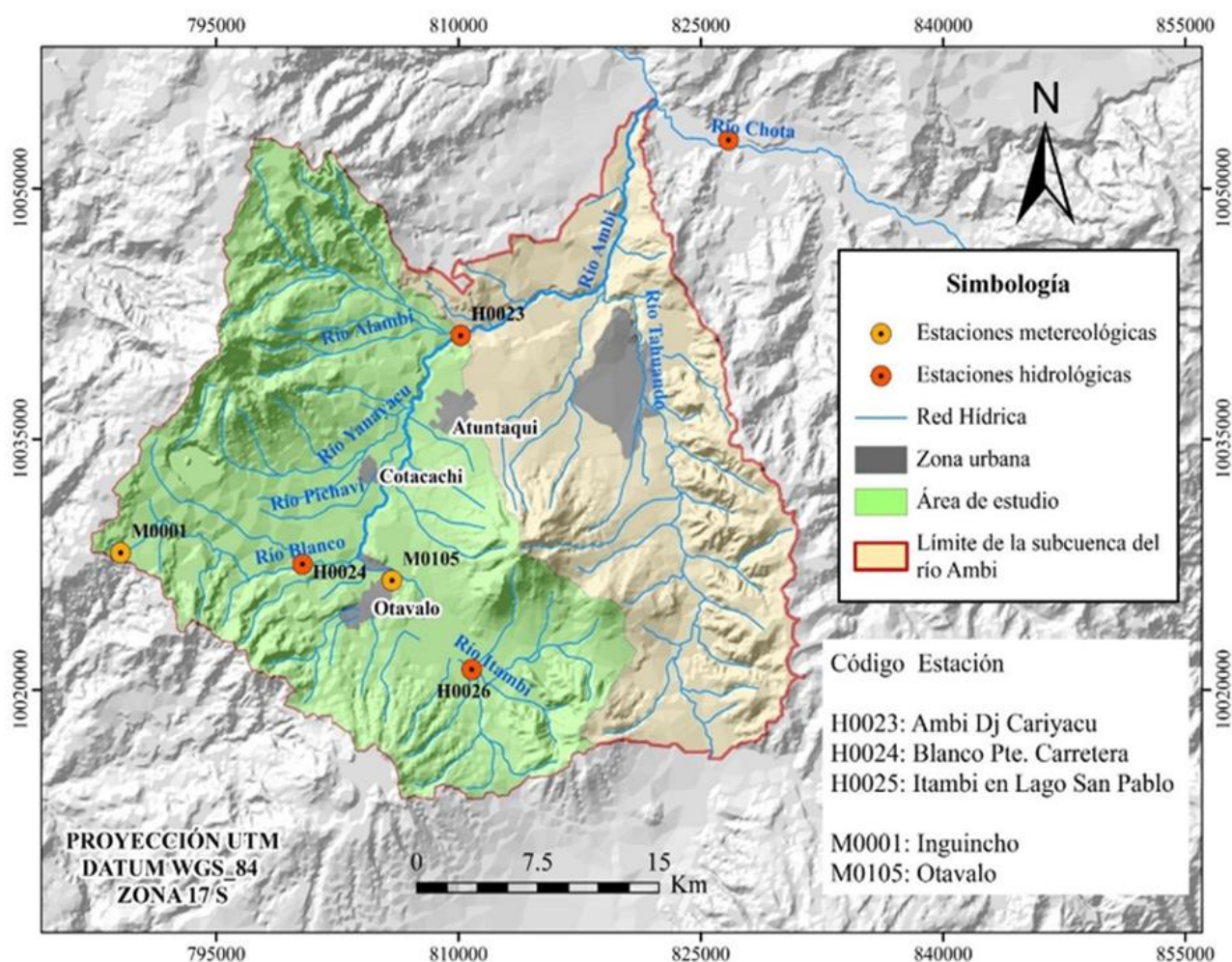
2.2 Métodos

2.2.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Ambi

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica del río Ambi se empleó herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ArcGIS, junto con un Modelo Digital de Elevación (DEM) de al menos 30 m de resolución. Diversos estudios han mostrado que la precisión del DEM y la resolución utilizada influyen significativamente en los parámetros morfométricos de la cuenca y en la calidad de la delimitación (Tesema, 2021). Asimismo, procedimientos con ArcGIS han descrito de modo detallado la secuencia de operaciones para obtener límites fiables de cuenca (Abbas, 2023) (Figura 4).

Figura 4

Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológicas del río Ambi



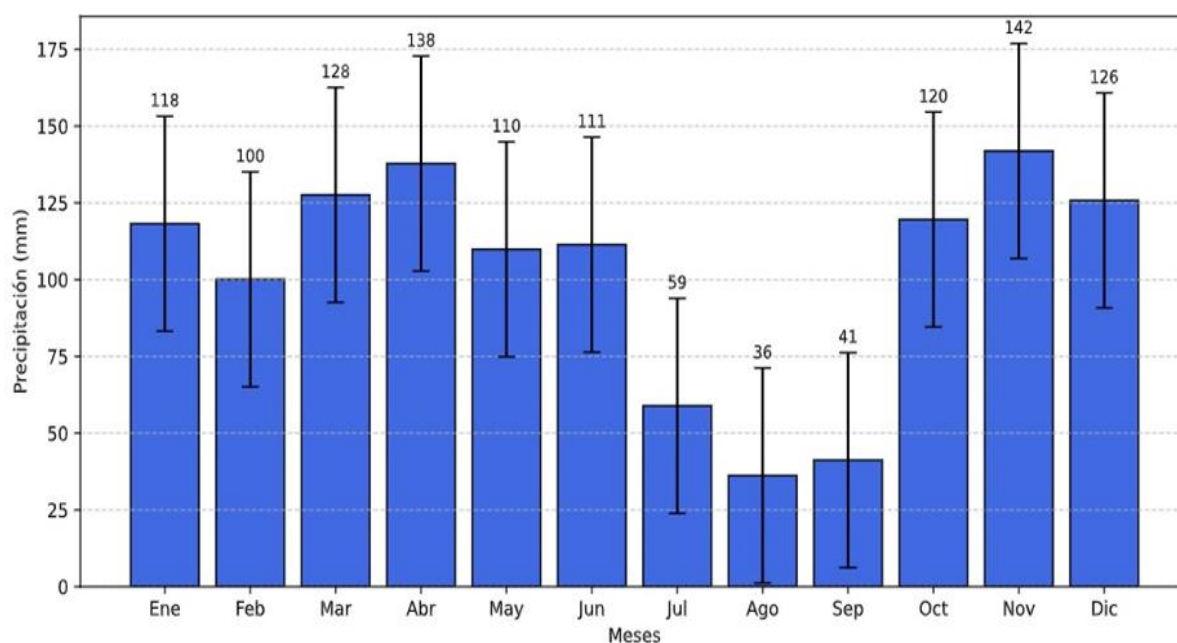
(Vista de Índice de Escasez Hídrica En La Cuenca Del Río Ambi, Ecuador, 2025)

2.2.2 Recolección y análisis de información hidrometeorológica

Se recopiló datos históricos de precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudales y nivel freático provenientes de diversas fuentes: el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), estaciones locales, proyectos previos y datos satelitales de NASA POWER (2023). Para el análisis climático e hidrológico de la cuenca del río Ambí, se priorizaró la estación AMBI – DJ Cariyacu (H0023), complementando los registros faltantes mediante técnicas de relleno de datos basadas en correlación entre estaciones. (Vinicio Carrera-Villacrés et al., 2016) (Figura 5).

Figura 10

Distribución de la precipitación de la Estación Ambi DJ Cariyacu



Además, se elaboró un diagrama ombrotérmico de Guassen para poder identificar los periodos húmedos y secos.

2.2.3 Climatología

Para el análisis climático de la cuenca del río Ambi, se recopiló datos meteorológicos históricos correspondientes al periodo 2019–2022, obtenidos de la plataforma POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) de la NASA. Esta fuente proporciona datos

satelitales validados que son ampliamente utilizados en estudios energéticos, hidrológicos y climáticos por su alta confiabilidad y cobertura espacial (NASA POWER, 2023) (Tabla 1).

Tabla 1

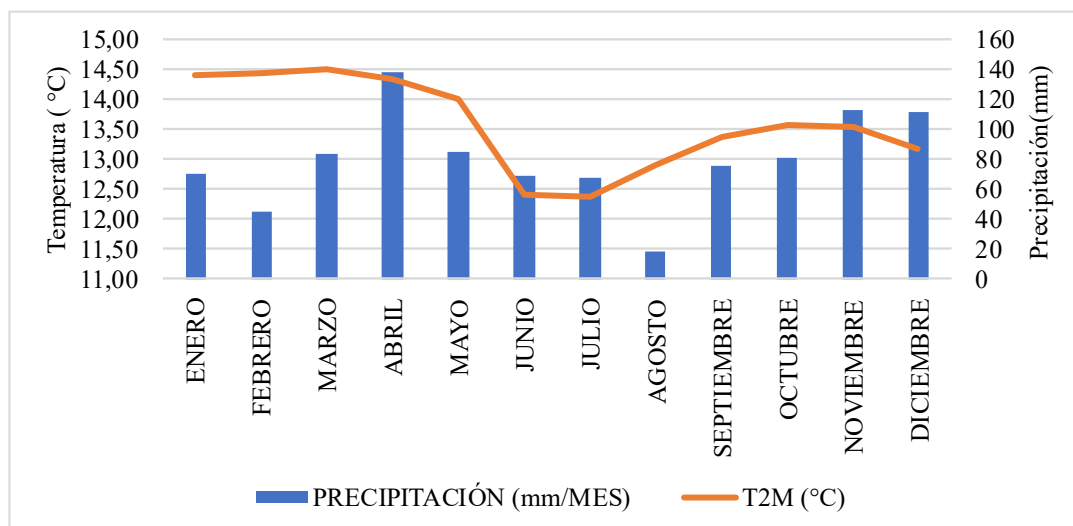
Datos meteorológicos históricos

Año	Precipitación [mm]	Humedad Relativa [%]	Temperatura [°C]
2014	880	80,77	14,98
2015	920	81,47	14,826
2016	790	78,40	13,973
2017	870	82,29	14,61
2020	910	84,41	15,16
2021	860	82,05	14,78
2023	810	79,04	14,09

Los parámetros considerados fueron la precipitación mensual (mm), la temperatura media mensual (°C) y la humedad relativa mensual (%). Con el objetivo de corroborar estos resultados, se obtuvo información complementaria del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), específicamente los registros de precipitación total mensual para la provincia de Imbabura, disponibles en su plataforma de datos abiertos para el año 2019 (INAMHI, 2021). Estos parámetros se integraron en bases de datos de Excel para análisis estadísticos y visualización gráfica, aplicando métricas descriptivas y análisis de correlación entre ambas fueron tabulados y procesados mediante Microsoft Excel con fines estadísticos y gráficos (Figura 6).

Figura 13

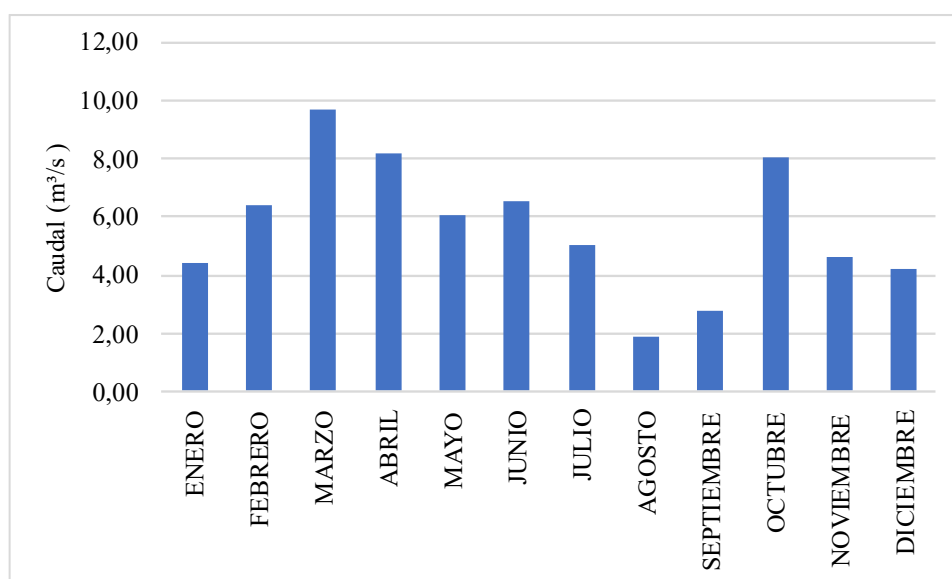
Diagrama Ombrotérmico del año 2019



2.3 Registro histórico y actualización de mediciones de caudal

Se implementó un registro sistemático de los caudales en la bocatoma, desarenador y cámara de presión, determinando la frecuencia de medición (diaria en épocas críticas y mensual en condiciones normales) según las necesidades operativas. La metodología seleccionada incluye el aforo directo mediante el uso del molinete Global Water modelo FP111, sensores de nivel/velocidad y curvas de calibración (WMO, 2018). (Figura 7).

Figura 7
Histograma de Caudales del 2020

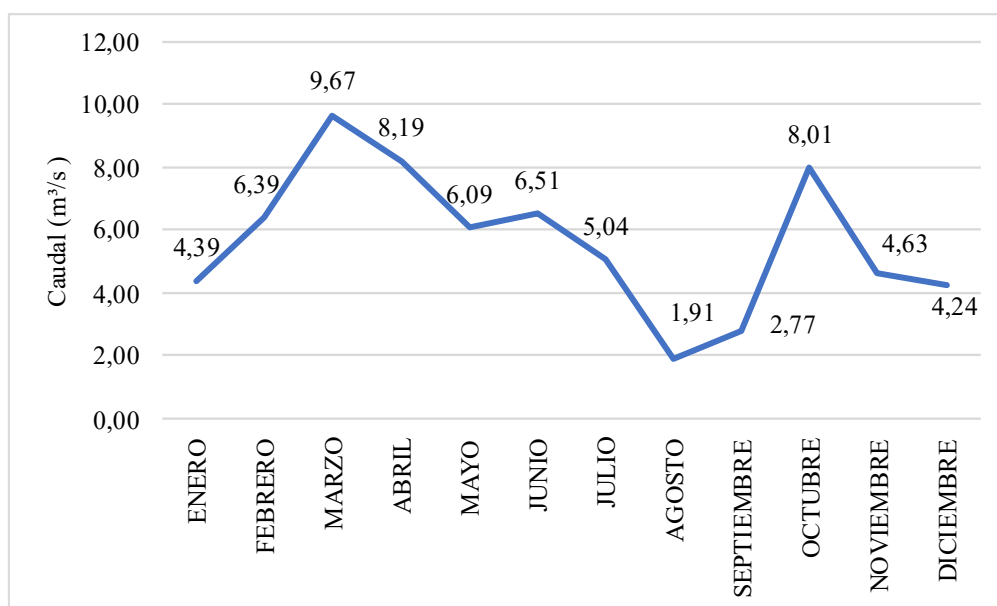


2.4 Análisis gráfico de tendencias de caudales máximos

Con los registros obtenidos se elaboraron gráficas de tendencias para los caudales máximos anuales y mensuales. Estas representaciones posibilitan la evaluación temporal de los caudales en relación con los patrones climáticos, y facilitan la estimación de caudales de diseño y proyecciones de operación para las centrales hidroeléctricas (Figura 8).

Figura 8

Tendencia mensual del caudal en el río Ambi del 2020



2.4.1 Determinación de los caudales máximos anuales y mensuales disponibles en el río Ambi

La medición inició con la caracterización de las centrales hidroeléctricas identificando la bocatoma, el desarenador y la cámara de presión. La bocatoma tiene como función es regular y captar el caudal de agua, para la producción de energía, ya sea mecánica o eléctrica. Las bocatomas posibilitan la captación del agua de los ríos y su conducción, utilizando el poder de la gravedad (SG-SICA, 2014). El desarenador es una unidad de tratamiento hidráulico que disminuye la velocidad del flujo acuático, lo que facilita la sedimentación de partículas de peso y tamaño determinados. Por lo general, incluye una o varias cámaras de sedimentación, en las

que la arena y los sólidos más densos se asientan en el fondo y posteriormente son desalojados a través de purgas o sistemas de limpieza.

2.5 Simulación hidrológica y modelación de escenarios

Con el fin de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca bajo diferentes escenarios climáticos se empleó modelos hidrológicos conceptual y distribuido, entre ellos destacan WEAP, HEC-HMS y SWAT. Estas herramientas de modelación permiten simular procesos fundamentales como la infiltración, el caudal base, almacenamiento hídrico y escorrentía superficial con alto nivel de detalle. Un elemento clave dentro de esta modelación es la ecuación de balance hídrico que representa la dinámica cambio a cambio entre el agua almacenada en el suelo y los cambios en ella que son inducidos mediante entradas y salidas al sistema. Para obtener una mirada más realista hacia la disponibilidad y distribución del agua en la cuenca. (Ecuación 5).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_{surf,i} - ET_i - W_{seep,i} - Q_{gw,i}) \quad (Ec.5)$$

Donde:

SW_t : Contenido de agua en el suelo al final del día t (mm)

SW_0 : Contenido de agua en el suelo al inicio de la simulación o al inicio del día (mm)

P_i : Precipitación total del día i (mm)

$Q_{surf,i}$: Escorrentía superficial generada en el día i (mm)

ET_i : Evapotranspiración real del día i (mm)

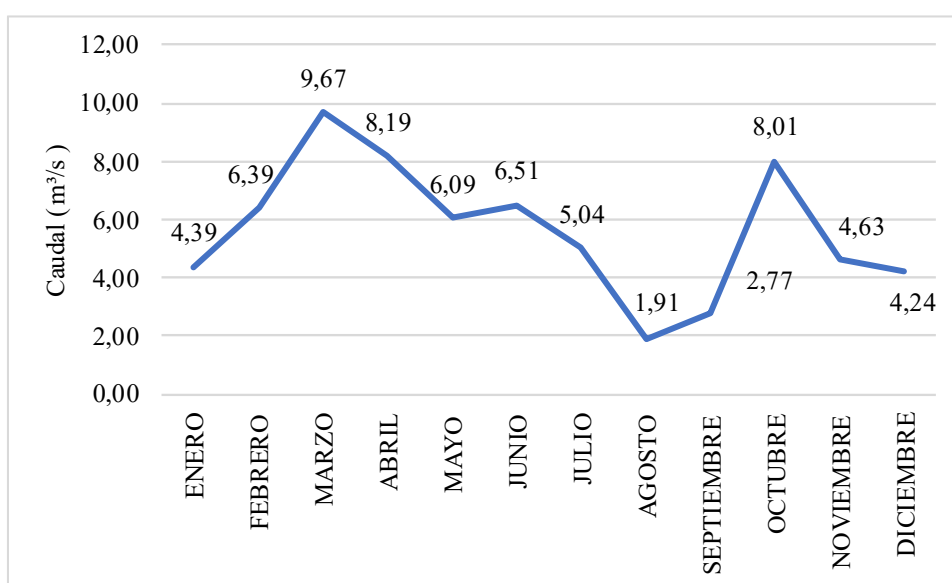
$W_{seep,i}$: Pérdida de agua por percolación profunda o flujo hacia la zona vadosa en el día i (mm)

$Q_{gw,i}$: Flujo base o aporte de agua subterránea hacia los cauces en el día i (mm)

El modelo seleccionado fue calibrado y validado con datos históricos reales de caudales y variables climáticas mediante indicadores estadísticos, como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2), con base en las recomendaciones metodológicas de Zhang et al. (2007) y Marahatta et al. (2021). Luego, se generó dos escenarios de cambio climático con condiciones normales, húmedas y secas. (Figura 9).

Figura 9

Disponibilidad del recurso hídrico en el punto de captación



2.6 Incorporación de modelos LSTM y optimización evolutiva en la predicción hidrológica

Para optimizar el rendimiento del modelo LSTM, se implementó una calibración de hiperparámetros mediante algoritmos evolutivos, en particular el algoritmo genético multiobjetivo no dominante (NSGA-II). Este método permitió optimizar simultáneamente diferentes métricas de desempeño como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), alcanzando un balance adecuado entre precisión y generalización (Deka et al., 2024). La selección del NSGA-II se fundamentó en su solidez y estabilidad probadas frente a otras alternativas como el MOEA/D y el NSGA-III. A pesar de

que este último tiene la capacidad de proporcionar beneficios cuando hay más de tres objetivos, es más complejo computacionalmente. (Jia et al., 2024).

La colaboración entre modelos físicos e inteligencia artificial fue muy importante. Ayudó a aumentar la exactitud de las predicciones. Los algoritmos evolutivos redujeron el margen de error y optimizaron la predicción de aumentos repentinos en los picos de flujo (Li et al., 2024; Jhong et al., 2024).

Por lo tanto, se empleó la técnica de redes LSTM para modelar series temporales y optimización evolutiva de múltiples objetivos, convirtiéndola, así en una herramienta actualizada y eficaz para anticipar condiciones hidrológicas a corto plazo.

2.7 Materiales, instrumentos y software

Para la recolección y análisis de datos hidrometeorológicos, se empleó diversos instrumentos de medición de campo y herramientas de software ampliamente reconocidos en la literatura científica por su precisión, confiabilidad y aplicabilidad en estudios hidrológicos y climáticos. La combinación de estos equipos y plataformas garantizará la calidad de los datos obtenidos y la solidez de los análisis realizados durante el desarrollo del estudio (Tabla 2)

Tabla 2

Herramientas e instrumentos aplicados en el estudio hidrológico

Instrumento /Software	Uso	Referencias
-----------------------	-----	-------------

GPS	Georreferenciación precisa de sitios de medición para integración en GIS	Gao (2021)
Portales INAMHI	Fuente oficial de datos climáticos en Ecuador	INAMHI (2023)
Power NASA	Datos climáticos y meteorológicos globales con alta resolución temporal y espacial	Stackhouse et al. (2018)
Minitab	Análisis estadístico, pruebas multivariantes y control de calidad	Montgomery (2020)
Microsoft Excel	Manejo preliminar y visualización de datos	Winston (2020)
Python	Análisis avanzado y procesamiento de grandes volúmenes de datos	Oliphant (2019); VanderPlas (2022)
ArcGIS	Análisis espacial, modelado geográfico y gestión avanzada de grandes volúmenes de datos.	ESRI (2021)

La precipitación anual fluctúa entre 250 mm y 4500 mm, siendo más altos los valores en el área noroccidental y más bajos hacia la región oriental de la cuenca.

3.1.2 Balance hídrico mensual

El balance hídrico mensual permitió evaluar la disponibilidad real del recurso hídrico en la cuenca del río Ambi, considerando los aportes por precipitación y las pérdidas por evapotranspiración potencial (Tabla 3).

Tabla 3

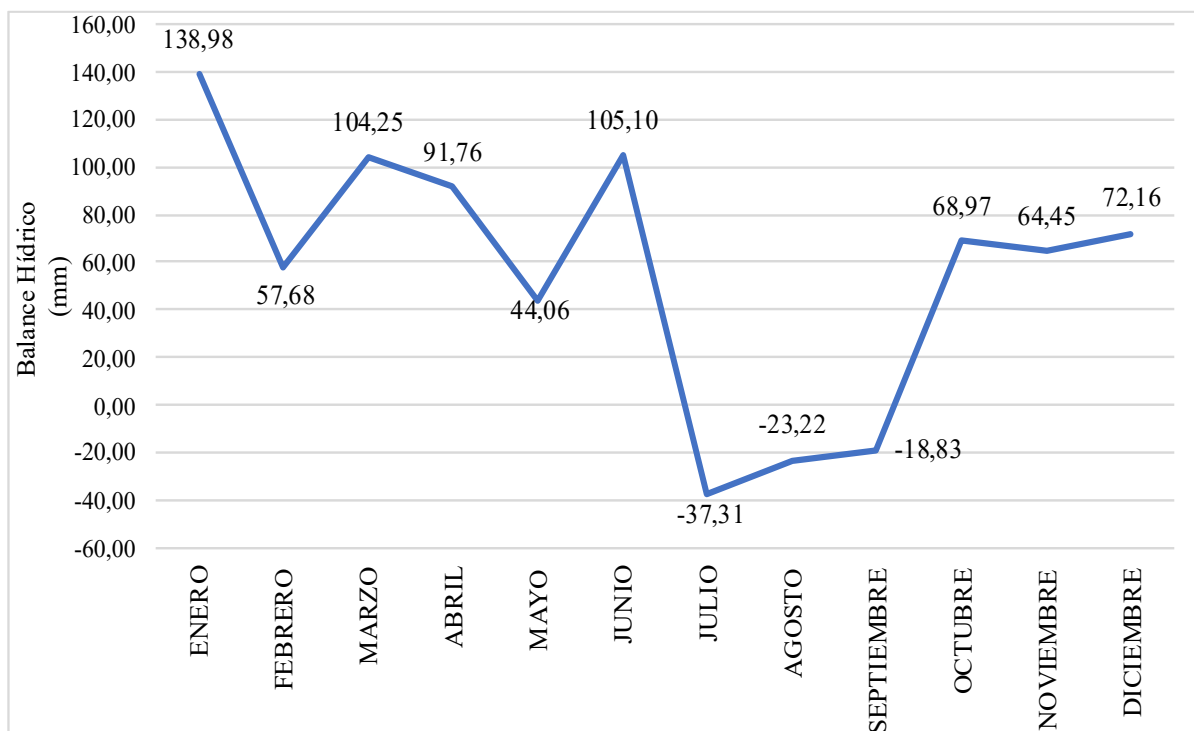
Balance hídrico mensual de la cuenca del río Ambi.

Mes	Precipitación [mm]	Temperatura [°C]	Factor de Holdridge	ETP [mm]	Balance Hídrico [mm]
ENERO	204,54	13,09	5,01	65,56	138,98
FEBRERO	119,39	13,64	4,52	61,71	57,68
MARZO	169,23	12,98	5,01	64,98	104,25
ABRIL	155,76	13,21	4,85	64	91,76
MAYO	109,88	13,14	5,01	65,82	44,06
JUNIO	164,19	12,19	4,85	59,09	105,1
JULIO	22,2	11,88	5,01	59,51	-37,31
AGOSTO	38,8	12,39	5,01	62,02	-23,22
SEPTIEMBRE	41,95	12,54	4,85	60,78	-18,83
OCTUBRE	136,78	13,54	5,01	67,81	68,97
NOVIEMBRE	127,86	13,08	4,85	63,41	64,45
DICIEMBRE	139,06	13,36	5,01	66,9	72,16

Los resultados indican que durante los meses de enero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre se presentan superávits hídricos, mientras que en julio, agosto y septiembre se evidencian déficits de agua, los cuales corresponden al período de estiaje característico de la cuenca (Figura 11).

Figura 24

Variación mensual del balance hídrico en la cuenca del río Ambi.



El mayor superávit hídrico se registra en junio (105,10 mm) y el mayor déficit, en julio (-37,31 mm). Esto confirma la fuerte estacionalidad del régimen hidrológico del río Ambi

3.1.3 Precipitación anual y comportamiento hidrológico

El análisis climatológico de la cuenca del río Ambi se basó en la evaluación de la precipitación anual acumulada y su relación directa con el comportamiento hidrológico del río entre 2010 y 2024. Este análisis permitió caracterizar la variabilidad climática interanual de la cuenca y establecer su influencia sobre la disponibilidad del recurso hídrico destinado a la generación hidroeléctrica en las centrales La Algodonera y Atuntaqui (Tabla 4).

Tabla 4*Datos meteorológicos históricos*

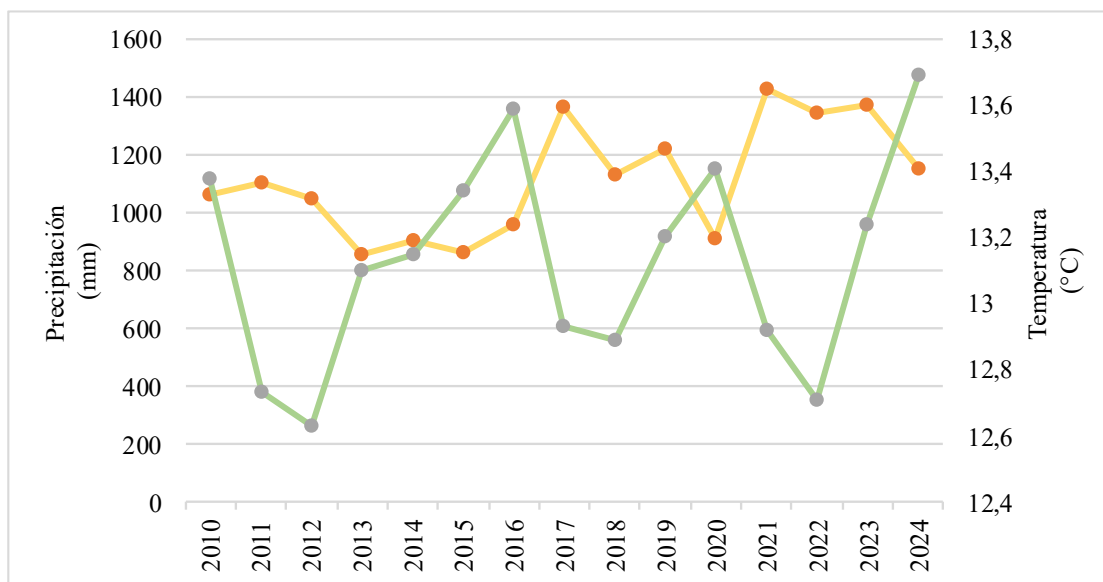
Año	Precipitación [mm]	Humedad Relativa [%]	Temperatura [°C]
2010	1059,72	81,62	13,38
2011	1100,01	83,77	12,73
2012	1049,82	83,33	12,63
2013	855,95	81,96	13,10
2014	905,04	81,68	13,15
2015	859,65	80,81	13,34
2016	958,15	81,27	13,59
2017	1368,61	84,09	12,93
2018	1128,02	83,81	12,89
2019	1223,06	83,30	13,20
2020	912,76	82,95	13,41
2021	1429,64	84,67	12,92
2022	1342,19	84,35	12,71
2023	1372,78	84,03	13,24
2024	1150,16	83,00	13,69

Los registros de precipitación anual evidenciaron un comportamiento altamente variable a lo largo del periodo de estudio, con valores que oscilaron entre 855,95 mm y 1429,64 mm. Esta amplitud pluviométrica reflejó la influencia de condiciones climáticas

cambiantes, propias de cuencas andinas, donde la distribución temporal de la precipitación no es uniforme y presenta marcadas diferencias entre años consecutivos (Figura 12).

Figura 12

Distribución anual de la precipitación- temperatura



El análisis de ambas variables mostró una relación inversa moderada entre la lluvia y la temperatura. En general, los años con más lluvia tuvieron temperaturas medias ligeramente más bajas. Por ejemplo, en 2017 y 2021, hubo mucha lluvia y temperaturas cercanas o inferiores a 13°C. La cuenca del río Ambi depende mucho de la lluvia, mientras que la temperatura se mantiene relativamente estable con el paso del tiempo. Esta dinámica climática influye directamente en la disponibilidad de agua y en el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.

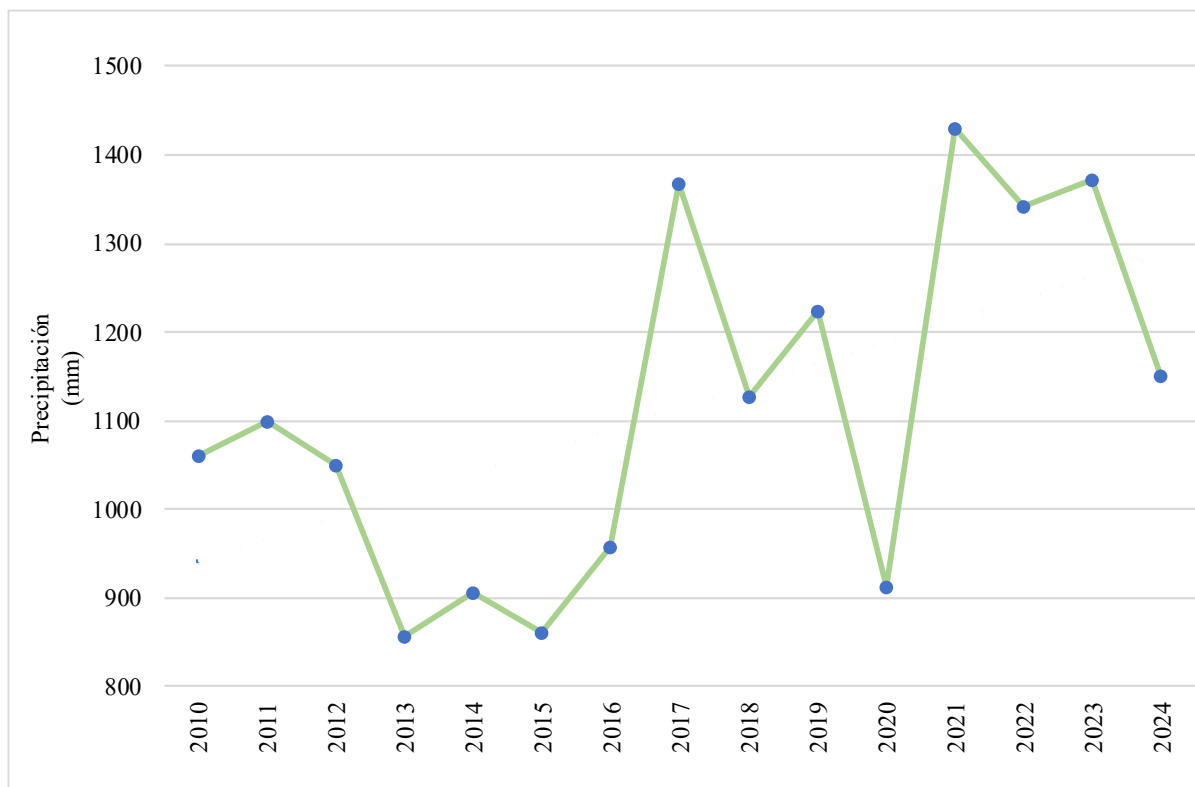
3.1.4 Tendencia y variabilidad climática

La precipitación anual evidenció una alta variabilidad, con alternancia entre años secos y húmedos a lo largo del periodo analizado. Como se observa en la Figura 13, los años 2013, 2014 y 2015 presentaron precipitaciones inferiores a 910 mm, reflejando condiciones relativamente secas en la cuenca. Si bien no se identificó una tendencia lineal estricta en toda

la serie, se evidenció un aumento en la frecuencia de años húmedos hacia la parte final del periodo de estudio.

Figura 13

Tendencia de la precipitación anual



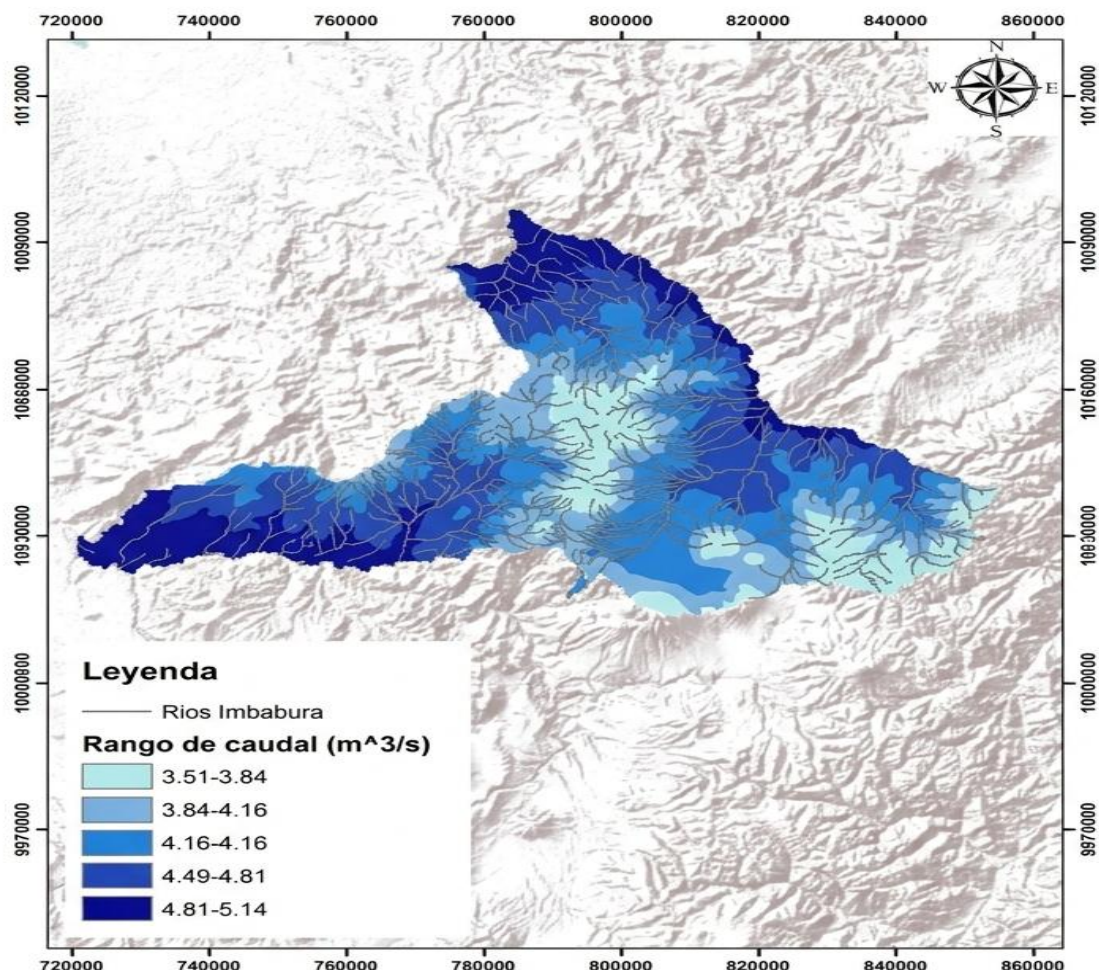
3.2 Variación mensual del caudal y estacionalidad

Con el fin de analizar la variabilidad intra-anual del caudal del río Ambi, se determinó el caudal medio mensual promedio multianual correspondiente al período 2010–2024. Este análisis permitió identificar el comportamiento hidrológico típico del río y evaluar la

estacionalidad del recurso hídrico que abastece a las centrales hidroeléctricas La Algodonera y Atuntaqui (Figura 14).

Figura 14

Distribución espacial de los caudales medios mensuales en la cuenca del río Ambi.



El mapa muestra que los caudales varían mucho según la zona. Esto se debe principalmente a la topografía, al gradiente altitudinal y a como se distribuye la precipitación. Los valores de caudal más altos se encuentran en las partes altas y medias de la cuenca. Esto sucede especialmente en las zonas montañosas, donde hay más aporte de agua. Esto ayuda a que se genere más escorrentía superficial y a que se recargue el agua subterránea.

Los valores del caudal medio mensual promedio evidencian una marcada estacionalidad en la distribución del caudal a lo largo del año, reflejando variaciones significativas entre los periodos húmedo y seco (Tabla 5).

Tabla 5

Caudal medio mensual promedio del río Ambi

Mes	Caudal medio [m³/s]
Enero	5,33
Febrero	5,62
Marzo	6,3
Abril	7,29
Mayo	5,8
Junio	3,73
Julio	2,62
Agosto	1,63
Septiembre	2,07
Octubre	4,57
Noviembre	6,25
Diciembre	5,37

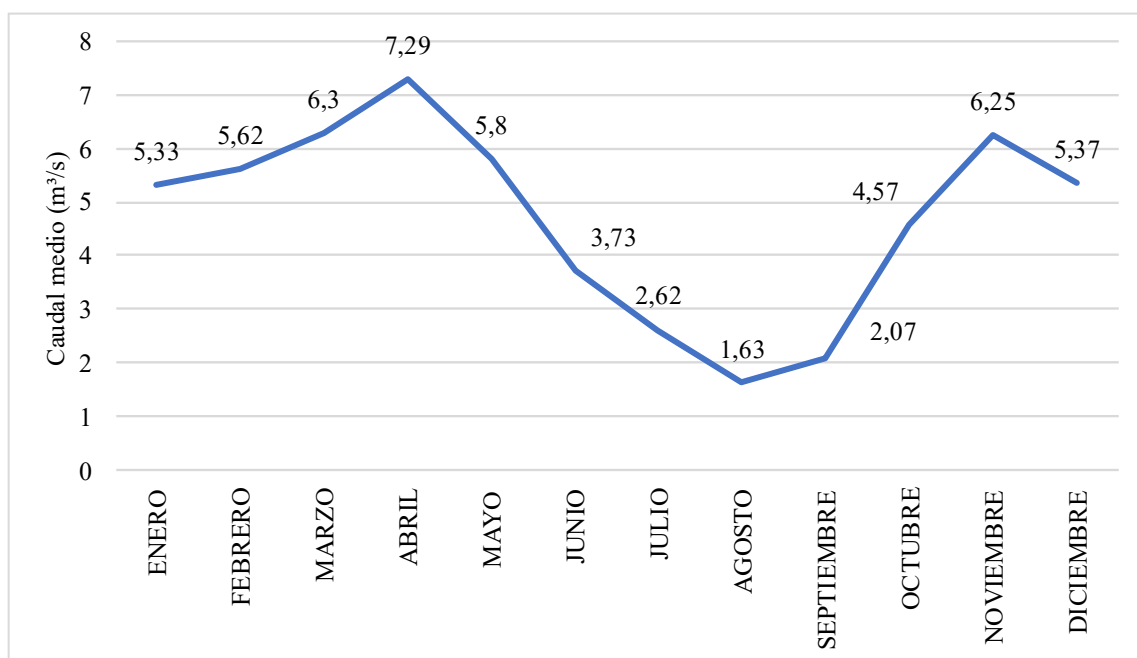
Como se observa en la Tabla 5, los mayores valores de caudal se registran durante los meses correspondientes a la estación lluviosa, alcanzando un máximo promedio en abril con 7,29 m³/s, lo cual coincide con el periodo de mayor precipitación en la cuenca. De manera

similar, los meses de marzo y noviembre presentan caudales superiores a $6,24 \text{ m}^3/\text{s}$, evidenciando la influencia directa del régimen pluviométrico sobre la esorrentía superficial.

En cambio, en la estación seca el caudal desciende de manera gradual y llega a su punto más bajo en los meses de julio y agosto, con promedios mensuales de $2,62 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,63 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Esta disminución restringe la disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica y puede dar lugar a condiciones operativas próximas al caudal ecológico (Figura 15).

Figura 15

Régimen hidrológico mensual promedio del río Ambi



Se observa un incremento progresivo del caudal desde enero hasta alcanzar un máximo en abril, con un caudal medio de $7,29 \text{ m}^3/\text{s}$. Posteriormente, a partir de mayo, el caudal presenta una disminución sostenida, alcanzando valores mínimos en julio y agosto, correspondientes a la estación seca. A partir de septiembre se evidencia una recuperación gradual del caudal, asociada al inicio de la temporada lluviosa, lo que incrementa la disponibilidad hídrica para la generación hidroeléctrica en los meses finales del año.

3.3 Análisis de la curva de duración de caudales y determinación de caudales característicos

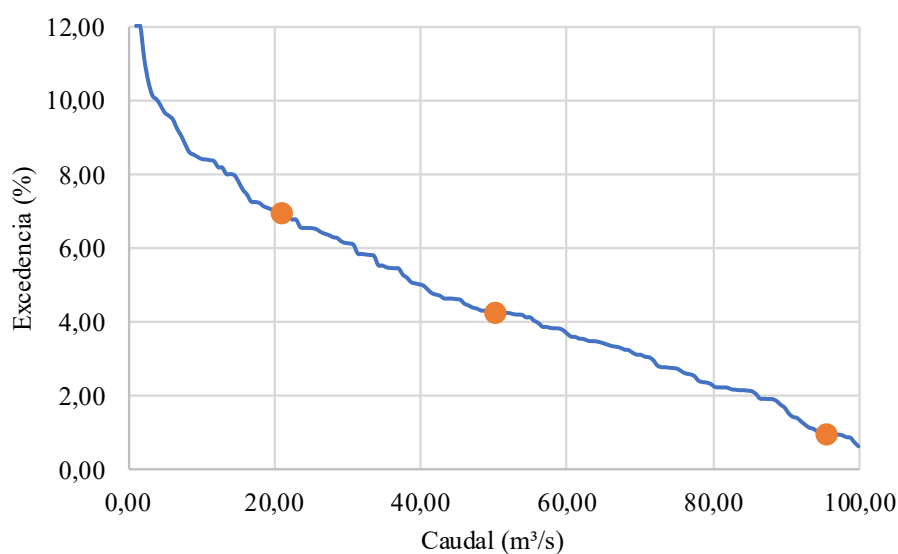
3.3.1 Curva de duración de caudales

A partir de la serie mensual de caudales correspondiente al período de estudio, se construyó la curva de duración de caudales del río Ambi, la cual permitió identificar los caudales característicos utilizados para el análisis del potencial hidroeléctrico.

Este tipo de análisis permite evaluar la disponibilidad hídrica del recurso en función del tiempo, constituyéndose en una herramienta fundamental para la planificación, diseño y operación de centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui” de SERMAA EP (Figura 16).

Figura 35

Curva de duración de caudales del río Ambi



Los valores que se obtienen de Q20, Q50 y Q95 nos dicen que tan seguros podemos estar de que tengamos agua disponible. El caudal Q20 es cuando existe mayor cantidad de agua, lo que sucede cuando el tiempo es húmedo. El Q50 es cuando la disponibilidad es media. Y el Q95 nos muestra los momentos en que hay poca agua, lo que sucede durante la estación seca.

3.3.2 Determinación de los caudales característicos Q_{20} , Q_{50} y Q_{95}

La curva de duración de caudales permitió, mediante el análisis estadístico por percentiles, la determinación de los caudales característicos Q_{20} , Q_{50} y Q_{95} , los cuales representan los caudales excedidos el 20 %, 50 % y 95 % del tiempo, respectivamente.

Los valores obtenidos se presentan en la siguiente tabla (Tabla 6).

Tabla 6

Caudales característicos

Caudal característico [%]	Valor [m ³ /s]	Significado hidrológico
Q ₂₀	6,98	Caudal excedido el 20 % del tiempo, asociado a períodos de alta disponibilidad hídrica
Q ₅₀	4,29	Caudal medio del régimen hidrológico, representativo de condiciones normales
Q ₉₅	0,98	Caudal excedido el 95 % del tiempo, correspondiente a condiciones críticas o de estiaje

El análisis de la curva de duración de caudales evidencia una marcada variabilidad hidrológica en la cuenca del río Ambi, característica de sistemas fluviales influenciados por un régimen pluviométrico estacional. El valor de $Q_{20} = 6,98 \text{ m}^3/\text{s}$ refleja escenarios de alta disponibilidad hídrica, típicos de la estación lluviosa, en los cuales el recurso hídrico disponible permite maximizar la generación hidroeléctrica de las centrales “La Algodonera” y “Atuntaqui”. No obstante, este caudal presenta una baja permanencia temporal, por lo que no resulta adecuado para ser considerado como caudal de diseño.

Por su parte, el $Q_{50} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$ corresponde al caudal mediano del régimen hidrológico del río Ambi, siendo excedido el 50 % del tiempo. Este valor representa un equilibrio entre disponibilidad y confiabilidad del recurso hídrico, constituyéndose en un parámetro técnico adecuado para la determinación del caudal de diseño, ya que garantiza una operación estable de las centrales durante una proporción significativa del año.

Finalmente, el $Q_{95} = 0,98 \text{ m}^3/\text{s}$ indica condiciones hidrológicas críticas, propias de períodos de estiaje, en los que la disponibilidad del recurso es limitada. Este caudal es fundamental para estimar escenarios de baja producción y examinar si se está cumpliendo el caudal ecológico, lo cual garantiza la sustentabilidad ambiental del sistema fluvial y la continuidad del ecosistema acuático. Los resultados que se obtuvieron de la curva de duración de caudales que proporcionan una firme base técnica para determinar el empleo hidroenergético del río Ambi. Esto hace posible establecer parámetros fiables para el diseño, la operación y la mejora continua de las plantas hidroeléctricas de SERMAA EP.

3.4 Determinación del caudal de diseño

3.4.1 Criterio de selección del caudal de diseño

En el presente estudio, el caudal de diseño fue determinado a partir del análisis de la curva de duración de caudales del río Ambi, utilizando como criterio técnico el caudal Q_{50} , el cual representa el caudal excedido el 50 % del tiempo y refleja condiciones hidrológicas medias del sistema fluvial.

Este criterio se utiliza con frecuencia en investigaciones hidroeléctricas porque posibilita asegurar una operación estable durante un periodo importante del año, lo que evita el sobredimensionamiento de las obras hidráulicas y el uso del recurso

3.4.2 Caudal de diseño adoptado

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Sección 4.3, el valor del caudal característico Q_{50} para el río Ambi, correspondiente al período 2010–2024, es:

$$Q_{50} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor fue adoptado como caudal de diseño para la evaluación del potencial hidroeléctrico de las centrales “La Algodonera” y “Atuntaqui” de SERMAA EP, al considerarse representativo del régimen hidrológico medio del río y adecuado para la planificación energética.

$$Q_d = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.4.3 Análisis del caudal de diseño en relación con la disponibilidad hídrica

El caudal de diseño seleccionado se encuentra comprendido entre los valores de alta y baja disponibilidad hídrica del sistema, delimitados por los caudales Q_{20} y Q_{95} . Esta condición permite asegurar que, durante períodos lluviosos, el sistema opere sin restricciones por falta de recurso, mientras que en períodos secos se mantenga una operación controlada, priorizando el cumplimiento del caudal ecológico y la sostenibilidad ambiental.

3.4.4 Relación del caudal de diseño con la altura neta y las pérdidas hidráulicas

El aprovechamiento energético del caudal de diseño depende directamente de la altura neta disponible, la cual resulta de la diferencia entre la altura bruta del sistema y las pérdidas hidráulicas asociadas al transporte del agua.

Para la central hidroeléctrica evaluada se dispone de una altura bruta de 43,24 m, mientras que las pérdidas hidráulicas están compuestas por pérdidas menores de 6,975 m y pérdidas por fricción de 2,557 m, lo que representa pérdidas hidráulicas totales de 9,532 m.

Por lo tanto, la altura neta que se puede utilizar para el aprovechamiento de energía es:

$$H_n = 43,24 - 9,532 = 33,71 \text{ m}$$

El valor de la altura neta muestra que, para la producción hidroeléctrica, es posible utilizar una parte importante de la energía potencial disponible; las pérdidas hidráulicas se encuentran dentro de los límites razonables para las centrales hidroeléctricas de pasada. La base esencial para calcular la potencia instalada y estimar la energía generada es la conjunción de esta altura neta con el caudal de diseño adoptado, análisis que se realiza en las secciones siguientes.

3.5 Análisis del caudal ecológico

El caudal ecológico fue evaluado con el propósito de garantizar la preservación del ecosistema fluvial del río Ambi, asegurando simultáneamente la continuidad operativa de las centrales hidroeléctricas. Los resultados muestran que el caudal ecológico presenta una variabilidad significativa entre la estación seca y la estación lluviosa.

En este estudio, el caudal ecológico se determinó con la finalidad de evaluar su incidencia sobre la operación de las centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui”, garantizando el equilibrio entre la generación de energía y la protección del recurso hídrico.

3.5.1 Método de Tennant

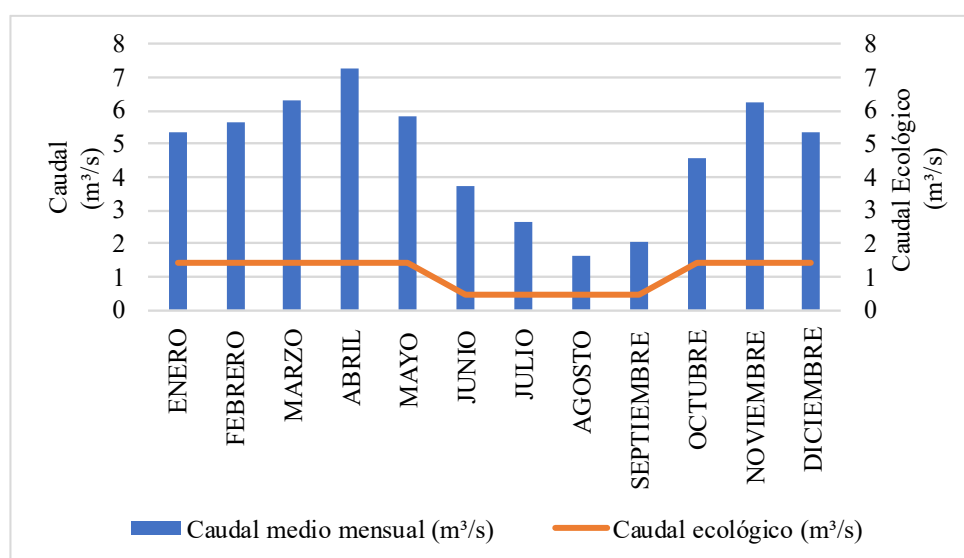
Para la estimación del caudal ecológico se empleó el método de Tennant, también conocido como método Montana, el cual se basa en la asignación de un porcentaje del caudal medio anual del río, en función de las condiciones hidrológicas y ecológicas deseadas.

A partir del caudal medio anual del río Ambi, estimado en 4,71 m³/s, se obtuvieron los siguientes valores de caudal ecológico según el método de Tennant (Tabla 7).

Tabla 7*Caudal ecológico según método de Tennant*

Condición hidrológica	%	Caudal ecológico [m ³ /s]
Épocas secas	10%	0,471
Época lluviosa	30%	1,413

Los resultados reflejan que, durante la época seca, el caudal ecológico mínimo a respetar es de 0,471 m³/s, lo cual representa un umbral crítico por debajo del cual no debe operar la central hidroeléctrica para evitar impactos severos en el ecosistema acuático. En contraste, en la época lluviosa, el caudal ecológico se incrementa a 1,413 m³/s, lo que permite mantener mejores condiciones de conectividad y disponibilidad ambiental en el cauce (Figura 17).

Figura 17*Comparación entre el caudal medio mensual y el caudal ecológico*

A partir de un caudal medio anual de 4,71 m³/s, se establecieron valores de caudal ecológico de 1,413 m³/s para la época lluviosa (30 %) y de 0,471 m³/s para la época seca (10 %). Estos valores permiten garantizar condiciones mínimas adecuadas para la preservación del ecosistema acuático, sin comprometer significativamente la generación hidroeléctrica.

3.6 Determinación del caudal aprovechable

Considerando un caudal de diseño de 4,29 m³/s y un caudal ecológico de 0,471 m³/s, determinado mediante el método de Tennant para la época seca, el caudal neto aprovechable para la generación hidroeléctrica es:

$$Q_{ap} = 4,29 - 0,471 = 3,82 \text{ m}^3/\text{s}$$

El valor de caudal aprovechable obtenido refleja una reducción moderada respecto al caudal de diseño, como resultado de la restricción ambiental impuesta por el caudal ecológico. No obstante, este caudal permite mantener una operación eficiente de las centrales hidroeléctricas, garantizando simultáneamente la conservación del ecosistema acuático del río Ambi.

La consideración del caudal aprovechable constituye un aspecto clave en la estimación realista de la potencia y energía generada, evitando sobreestimaciones y asegurando la coherencia técnica del análisis energético.

3.7 Potencia y energía generada

3.7.1 Cálculo de la potencia hidroeléctrica

Los resultados indican que, considerando las condiciones hidráulicas y operativas del sistema, la potencia hidroeléctrica generable alcanza aproximadamente:

$$P = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,82 \cdot 33,71 \cdot 0,85$$

$$P = 1071000 \text{ W} \approx 1,07 \text{ MW}$$

3.7.2 Estimación de la energía generada

A partir de la potencia hidroeléctrica estimada y asumiendo un régimen de operación continua a lo largo del año, equivalente a 8 760 horas anuales, junto con un factor de planta de 0,9 se procede a estimar la energía eléctrica generada por el aprovechamiento hidroeléctrico analizado.

$$E = 1,07 \cdot 8760 \cdot 0,9 = 8436 \text{ MWh/año} = 8,44 \text{ GWh/año}$$

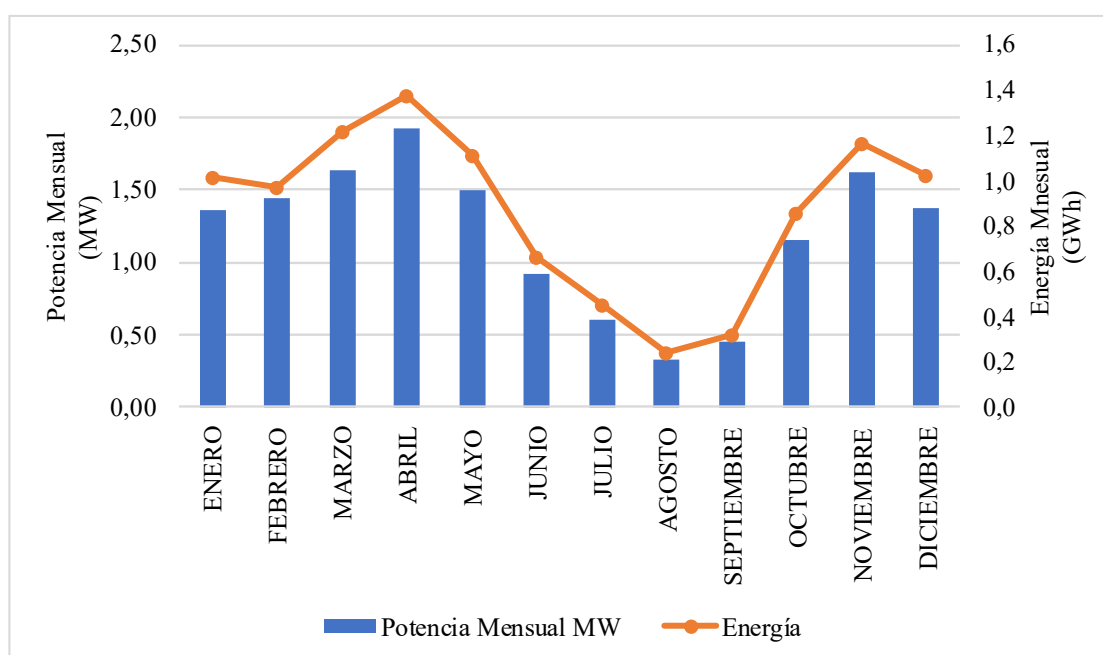
Este valor representa una estimación más realista de la producción energética anual, al considerar las variaciones operativas, paradas por mantenimiento y fluctuaciones del régimen hidrológico, proporcionando así una evaluación confiable del potencial hidroeléctrico del río Ambi para las centrales “La Algodonera” y “Atuntaqui” de SERMAA EP.

3.7.3 Variación mensual de la potencia y energía hidroeléctrica

Con base en los caudales medios mensuales y considerando la altura neta disponible y el rendimiento global del sistema, se estimaron la potencia y la energía hidroeléctrica generada mensualmente (Figura 18).

Figura 18

Variación mensual de la potencia y energía generada



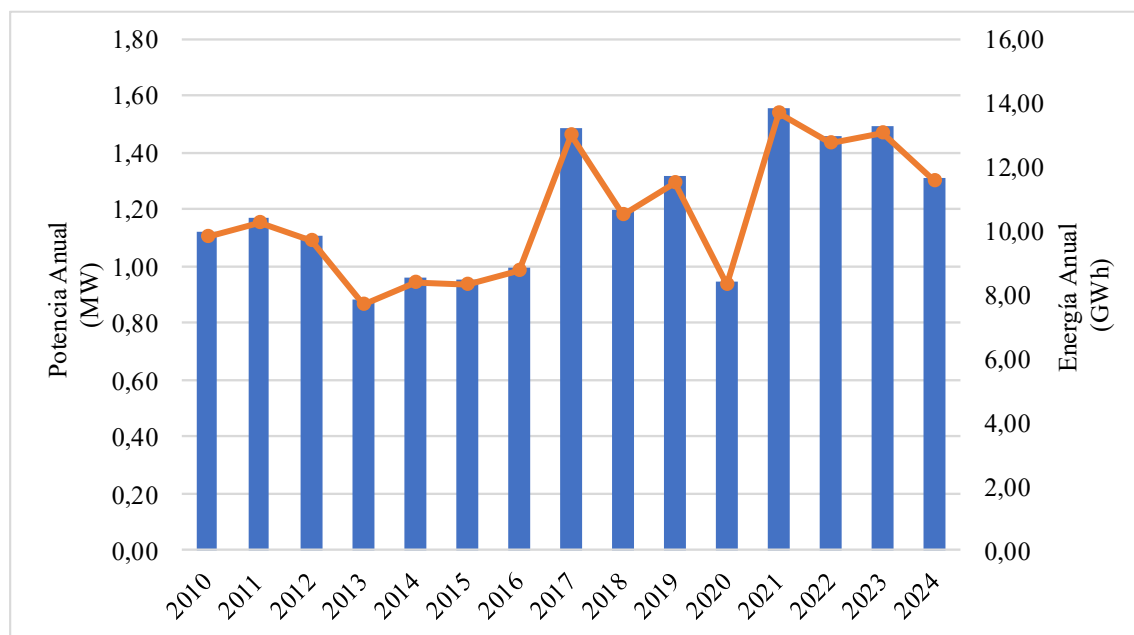
Se evidencia un comportamiento estacional marcado, estrechamente vinculado al régimen hidrológico de la cuenca. Durante los meses de mayor disponibilidad hídrica, particularmente marzo, abril y noviembre, se alcanzan los valores más altos de potencia y energía. En estos meses, la potencia generada varía entre 1,62 MW y 1,92 MW, mientras que la energía producida se sitúa entre 1,2 GWh y 1,4 GWh, reflejando condiciones óptimas para el aprovechamiento hidroeléctrico.

La potencia más alta se registra en abril, con 1,92 megavatios. Esto sucede cuando el caudal de agua es de 6,82 metros cúbicos por segundo. Esto muestra que la cantidad de agua disponible afecta directamente la cantidad de energía que se puede generar. En marzo, la potencia es de 1,64 megavatios, con un caudal de 5,83 metros cúbicos por segundo. Esto confirma que esta época del año es la que más energía produce.

La energía que se genera cada mes muestra que la mayor parte de la producción anual se concentra entre marzo y mayo y también de octubre a diciembre. Esto es importante para planificar el mantenimiento, la operación y la producción futura de energía.

3.7.4 Variación anual de la potencia y energía hidroeléctrica

Con el fin de evaluar el comportamiento interanual del aprovechamiento hidroeléctrico del río Ambi, se realizó el análisis de la potencia y energía generada a escala anual para el período comprendido entre 2010 y 2024, a partir de los caudales medios anuales, el caudal turbinado y las condiciones hidráulicas del sistema (Figura 19).

Figura 19*Variación anual de la potencia y energía generada*

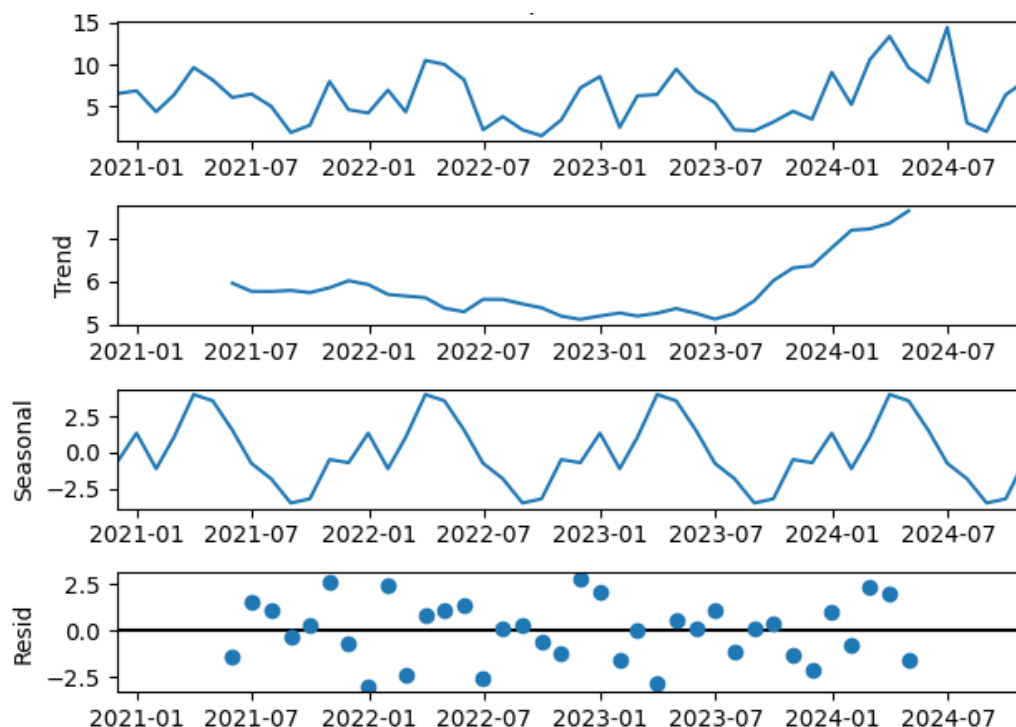
El análisis nos permite evidenciar una marcada variabilidad interanual, directamente asociada a las fluctuaciones hidrológicas de la cuenca del río Ambi. Los valores de potencia anual oscilan entre 0,88 MW en el año 2013 y 1,56 MW en el año 2021, mientras que la energía generada varía entre 7,71 GWh/año y 13,66 GWh/año, respectivamente.

El potencial hidroenergético del río Ambi es alto, lo que se comprueba con la energía media anual producida durante el periodo de estudio, de aproximadamente 10,7 GWh/año. Esto es factible desde un punto de vista técnico.

3.8 Análisis y predicción de la serie temporal de caudales

3.8.1 Descomposición de la serie temporal

La descomposición de la serie permitió identificar los componentes de tendencia, estacionalidad y residuales (Figura 20).

Figura 20*Descomposición de la serie temporal de caudales.*

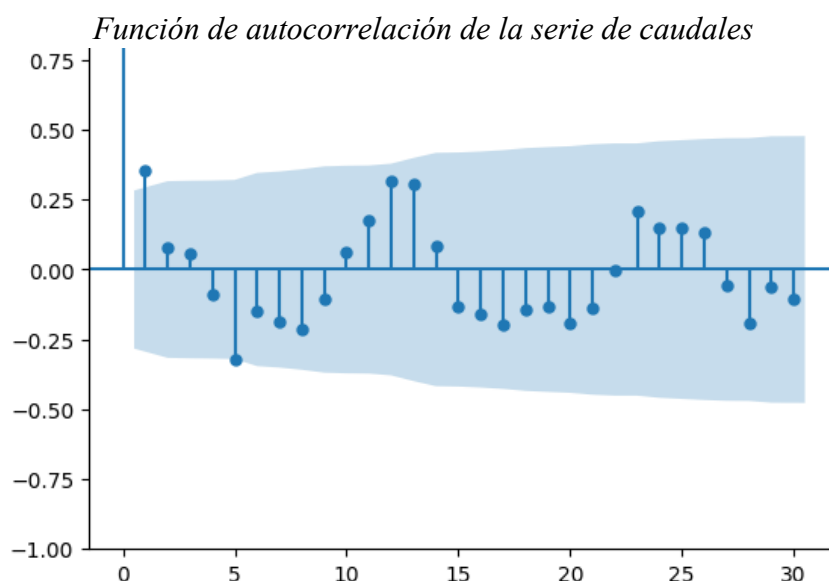
En el componente de tendencia se observa una variación gradual del caudal medio a lo largo del periodo analizado, evidenciándose ligeras fluctuaciones que responden a la variabilidad interanual del régimen hidrológico.

El componente estacional sigue un patrón que se repite cada cierto tiempo. Esto es común en series hidrológicas porque la lluvia cae de manera diferente durante el año. Esto muestra que hay ciclos en el caudal de agua que se repiten cada año.

Los residuos están alrededor de cero y no tienen un patrón claro. Esto significa que la descomposición muestra bien la estructura principal de la serie de datos.

3.8.2 Análisis de autocorrelación

El análisis de la función de autocorrelación de la serie se muestra en la (Figura 21).

Figura 46

El análisis de la Función de Autocorrelación (ACF) aplicado a la serie histórica de caudales del río Ambi constituyó un insumo fundamental para la estructuración del modelo predictivo correspondiente al período de noviembre 2025 – octubre 2026. El correlograma evidencia una autocorrelación positiva estadísticamente significativa en el primer rezago, que supera el intervalo de confianza del 95 %, lo que confirma la existencia de dependencia temporal de corto plazo en la serie. Esta característica indica que los valores mensuales de caudal están influenciados por los registros inmediatamente anteriores, lo cual es consistente con la dinámica hidrológica de almacenamiento, escorrentía y respuesta retardada de la cuenca.

Se ven oscilaciones que alternan entre valores negativos y positivos en los rezagos subsiguientes, aunque la mayor parte de ellas se encuentra dentro de los límites de significación estadística. Esto indica que no existe una dependencia fuerte a largo plazo.

Hay una correlación entre las observaciones sucesivas a lo largo del tiempo, sin embargo, esta dependencia se reduce a medida que el rezago aumenta. Por lo tanto, se espera que los coeficientes tiendan a un número cercano a cero, lo cual indica que la repercusión de los datos previos en los valores actuales va disminuyendo.

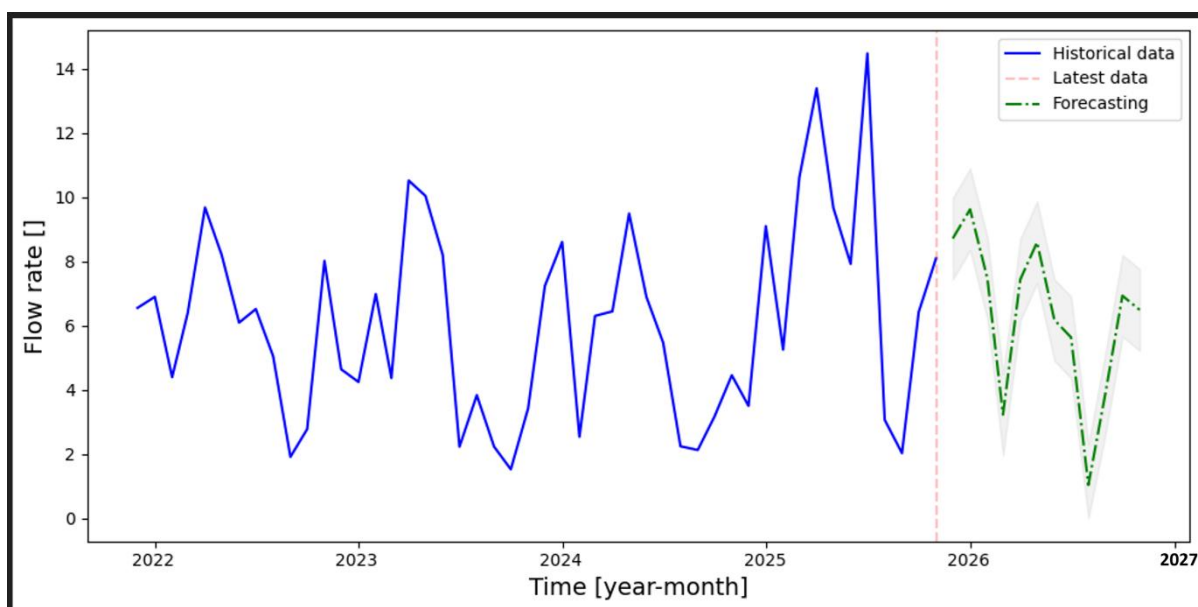
Esta evidencia estadística respalda la idoneidad de emplear un modelo autorregresivo integrado para la predicción de caudales del río Ambi en el horizonte de noviembre de 2025 – octubre de 2026, ya que la metodología captura adecuadamente la dependencia serial observada y mejora la capacidad de estimación del comportamiento hidrológico futuro.

3.8.3 Predicción de la serie de caudales

El resultado del pronóstico se presenta en la (Figura 22) donde se muestran los datos históricos, el punto de inicio del pronóstico y los valores estimados por el modelo.

Figura 22

Pronóstico de la serie temporal de caudales.



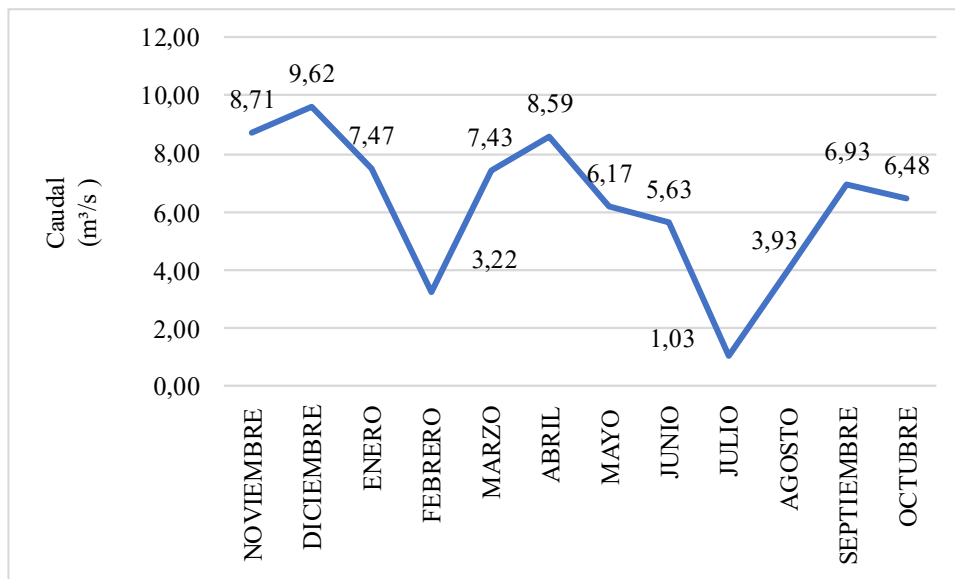
Con la finalidad de evaluar el comportamiento futuro del régimen hidrológico del río Ambi y su posible incidencia en la operación de las centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui”, se realizó la predicción de caudales mensuales para el período comprendido entre noviembre de 2025 y octubre de 2026, cuyos resultados se presentan en la (Tabla 8).

Tabla 8*Predicción mensual de caudales del río Ambi.*

Año	Mes	Caudal Predicho [m³/s]
2025	Noviembre	8,71
2025	Diciembre	9,62
2026	Enero	7,47
2026	Febrero	3,22
2026	Marzo	7,43
2026	Abril	8,59
2026	Mayo	6,17
2026	Junio	5,63
2026	Julio	1,03
2026	Agosto	3,93
2026	Septiembre	6,93
2026	Octubre	6,48

Los valores proyectados muestran una variabilidad estacional similar a la observada en los registros históricos, con caudales elevados durante la temporada lluviosa y valores mínimos durante la estación seca. Se espera que el caudal sea más bajo en julio de 2026(1,03 m³/s), según la tendencia habitual del estiaje de la cuenca. En cambio, los caudales más altos se estiman para diciembre de 2025 (9,62 m³/s) y para noviembre de 2025 (8,71 m³/s) (Figura 23).

Figura 23*Predicción mensual de caudales*



La predicción permite anticipar condiciones hidrológicas favorables para la generación hidroeléctrica durante la mayor parte del año, aunque se identifican meses críticos, particularmente entre julio y agosto, en los cuales la disminución del caudal podría afectar el rendimiento energético y requerir una gestión operativa más eficiente del recurso hídrico. El caudal medio anual predicho se obtuvo como el promedio de los valores mensuales, resultando un valor de:

$$Q_{medio, predi} = 6,27 \text{ m}^3/\text{s}$$

Los resultados muestran una marcada variabilidad estacional, con caudales elevados durante la temporada lluviosa, alcanzando un máximo de 9,62 m³/s en diciembre, y valores mínimos en la estación seca, particularmente en julio (1,03 m³/s), lo cual coincide con el patrón hidrológico histórico de la cuenca.

3.8.2 Determinación del caudal ecológico predicho

Para el cálculo del caudal ecológico bajo condiciones futuras, se aplicó el método de Tennant, considerando porcentajes del 10 % para época seca y 30 % para época lluviosa.

$$Q_{eco, seco} = 0,10 \cdot 6,27 = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{eco, lluvioso} = 0,30 \cdot 6,27 = 1,88 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 9

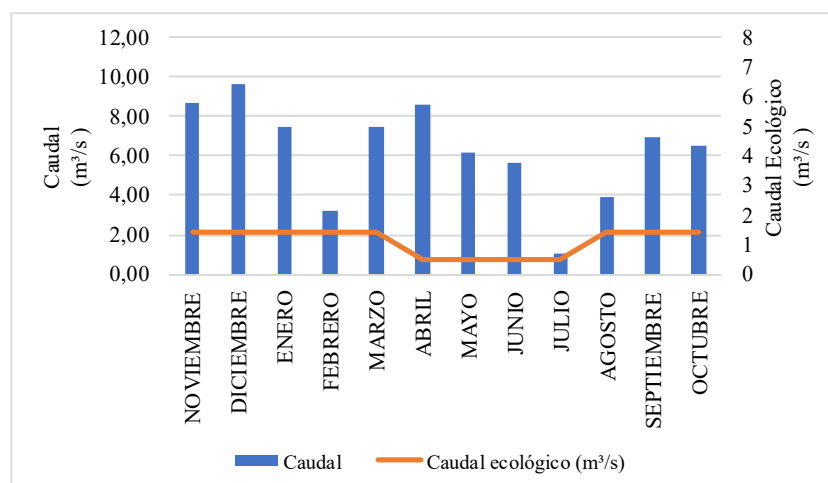
Caudal ecológico predicho según método de Tennant

Condición hidrológica	%	Caudal ecológico [m³/s]
Época seca	10%	0,63
Época lluviosa	30%	1,88

Estos valores establecen los umbrales mínimos necesarios para garantizar la conservación del ecosistema fluvial, asegurando la conectividad hidráulica, la oxigenación del agua y la preservación del hábitat acuático (Figura 24).

Figura 24

Variación mensual del caudal medio predicho y del caudal ecológico



Los resultados muestran que los mayores caudales predichos se presentan durante los meses de noviembre, diciembre, marzo y abril, con valores superiores a 8 m³/s, lo cual coincide con el período de mayor precipitación estimada en la cuenca. En contraste, los menores

caudales predichos se registran en los meses de julio y febrero, alcanzando valores cercanos a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, lo que evidencia una marcada estacionalidad hidrológica asociada al régimen climático local.

3.8.3 Caudal aprovechable bajo condiciones futuras

Considerando el caudal de diseño adoptado previamente $Q_d = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal ecológico correspondiente a la época seca $Q_{eco} = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal aprovechable predicho se obtiene como:

$$Q_{ap, pred} = 4,29 - 0,63 = 3,66 \text{ m}^3/\text{s}$$

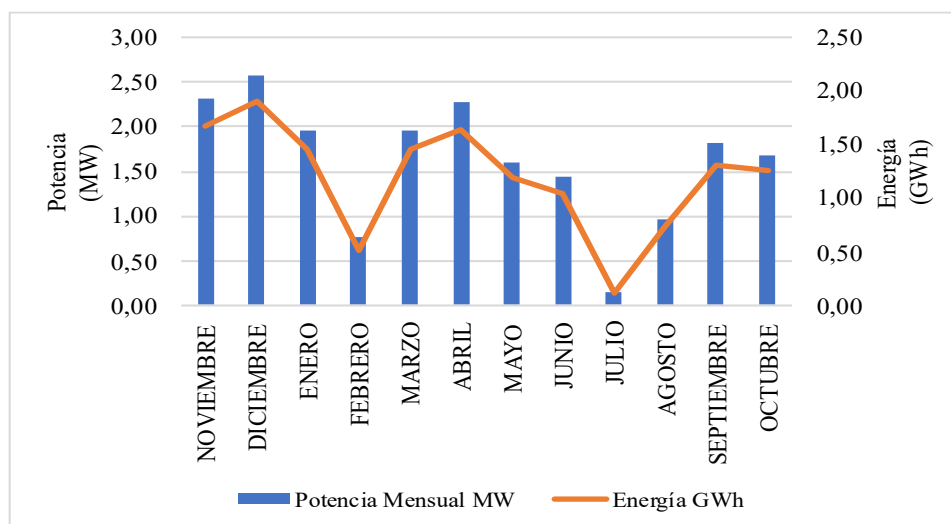
Este valor representa el caudal neto disponible para la generación hidroeléctrica bajo escenarios hidrológicos futuros, manteniendo el cumplimiento de las restricciones ambientales.

3.8.4 Proyección mensual de la potencia y energía hidroeléctrica

Con base en los caudales mensuales predichos para el período comprendido entre noviembre de 2025 y octubre de 2026, se estimó la potencia y la energía hidroeléctrica generada por las centrales “La Algodonera” y “Atuntaqui”, considerando la altura neta disponible, el rendimiento global del sistema y el cumplimiento del caudal ecológico mínimo. (Figura 25)

Figura 25

Variación mensual de la potencia y energía hidroeléctrica predicha



Los resultados muestran una fuerte estacionalidad en la producción de energía, la cual está muy relacionada con el cambio del caudal mensual. Las potencias máximas de alrededor de 2,57 MW, 2,28 MW y 1,81 MW correspondientes a diciembre de 2025, y a abril y noviembre de 2026, respectivamente, indican aumentos importantes en la producción de energía durante dichos periodos. Específicamente, diciembre tiene una generación eléctrica aproximadamente de 1,91 GWh, por lo que se considera como el mes que más energía aporta en el año.

Por el contrario, en la época de estiaje, especialmente en los meses de julio y febrero se da la máxima potencia y energía producida, con valores máximos de 0,16 MW y 0,77 MW respectivamente. En dichos meses la producción de energía cae hasta alrededor de 0,12 GWh y 0,52 GWh lo cual evidencia la disminución significativa de caudal disponible y su impacto directamente sobre el desempeño del sistema hidroeléctrico.

La serie de valores predichos presenta un alto grado de concordancia con el comportamiento hidrológico típico del río Ambi, lo cual implica que tanto la precipitación como la estacionalidad climática tienen una influencia directa en la capacidad de generación eléctrica con agua. Igualmente, los resultados permiten anticiparse a los periodos de baja y alta producción que se constituye en una herramienta fundamental para la planificación operativa, programación de mantenimiento y optimización de la gestión energética de las centrales hidroeléctricas “La Algodonera” y “Atuntaqui”.

3.8.5 Estimación de la energía anual generada

Asumiendo un régimen de operación continua durante 8760 horas anuales, la energía generada se calcula mediante:

$$E = P \cdot t$$

$$E = 1,03 \cdot 8760 \cdot 0,9 = 8121 \text{ MWh/h} = 8,12 \text{ GW/h}$$

Esto representa una generación anual aproximada 8,12 GWh/año, lo que confirma la viabilidad técnica del aprovechamiento hidroenergético futuro del río Ambi, siempre que se garantice el cumplimiento del caudal ecológico y una adecuada gestión operativa.

3.9 Discusión de Resultados

La investigación hidrológica realizada en la cuenca del río Ambi posibilitó determinar el comportamiento del régimen de caudales y su impacto directo sobre la producción de energía de las plantas hidroeléctricas "La Algodonera" y "Atuntaqui", que son gestionadas por SERMAA EP. Los hallazgos indican una gran variabilidad, tanto anual como estacional, con cifras mensuales que oscilan entre 1,16 m³/s y 6,82 m³/s y un promedio anual cercano a los 4,29 m³/s. Esto es coherente con la dinámica hidrológica típica de cuencas andinas expuestas a un régimen bimodal de lluvias.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos reportados por Buytaert et al. (2006), quienes analizaron el comportamiento hidrológico en cuencas de montaña en los Andes ecuatorianos y concluyeron que la estacionalidad climática genera fluctuaciones significativas en los caudales, condicionando la disponibilidad hídrica para diversos usos, entre ellos la generación hidroeléctrica. En su estudio, los autores identificaron que durante los períodos secos los caudales pueden reducirse hasta en un 60 %, lo cual es coherente con los valores mínimos registrados en el presente trabajo durante los meses de julio, agosto y septiembre (Chau, 2006).

El análisis de la duración de los caudales hidrológicos indicó que $Q_{20} = 6,98 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{50} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{95} = 0,98 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que evidencia una alta variabilidad en el régimen de flujo. La selección del Q_{50} como caudal de diseño se fundamenta en criterios técnicos ampliamente aceptados en estudios hidroeléctricos, que buscan equilibrar la confiabilidad operativa y la

eficiencia energética. Resultados similares fueron reportados por (Paish, 2002), quien señaló que el usar el caudal mediano como caudal de diseño garantiza una operación estable por un factor significativo del año y minimiza el riesgo de sobredimensionamiento.

La evaluación del potencial hidroeléctrico proporcionó una potencia instalada general del orden de 1.07 MW y una generación anual de energía de 9.0 GWh, tomando como base un factor de planta de 0.9. Eso está dentro del típico para acuaporinas en plantas de pasada en zonas montañosas, levantando las sombras de (Kaunda et al., 2012) que señalan que pequeñas centrales hidroeléctricas (3–6 m³/s de caudal y alturas netas de alrededor de 30 m) pueden generar potencia en el rango de 0,5-2 MW, con entregas anuales mayores a 7 GWh.

Por último, desde el análisis de las condiciones predictivas hidrológicas (2025–2026) se pudieron estimar caudales entre 1,03 m³/s y 9,62 m³/s para cada mes, lo que indica una probable alta variabilidad futura influenciada por el comportamiento climático. Estudios recientes del (IPCC , 2021) señalan que el cambio climático podría acentuar los extremos hidrológicos con una mayor frecuencia de eventos de sequía y de eventos pluviales, esto es congruente con las proyecciones aquí obtenidas. Bajo esas condiciones, la eficiencia del sistema hídrico se puede mejorar en un 20% con la utilización de las tácticas de regulación hidráulica y la operación óptima, la cual hace al sistema hidroeléctrico más operacionalmente resistente.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusión

El análisis climatológico mostró que la precipitación cambia mucho según la zona, con valores anuales entre 250 mm y 4500 mm, dependiendo de la topografía y la altitud de la cuenca. Además, la precipitación varió bastante de un año a otro, pasando de 855,95 mm en 2013 a 1429,64 mm en 2021. Esto demuestra que el sistema responde a la variabilidad climática de los Andes.

El balance hídrico medido cada mes mostró que había más agua de la necesaria en enero, marzo, abril, junio, noviembre y diciembre. En julio, agosto y septiembre, hubo muy poca agua. En julio, específicamente, faltaron 37,31 milímetros de agua. Esto indica que hay un patrón en la variación de la cantidad de agua a lo largo del año y que existe una época seca. Esto también se puede ver en la cantidad de agua que fluye por un lugar en un mes. Por ejemplo, en agosto solo fluían 1,63 m³/s en agosto y de 7,29 m³/s en abril.

Los caudales representativos obtenidos de la curva de duración fueron $Q_{20} = 6,98 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{50} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{95} = 0,98 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos datos muestran que el régimen hidrológico de la cuenca cambia mucho, con grandes diferencias entre las épocas de abundancia y de escasez de agua.

El análisis percentilar permitió identificar condiciones hidrológicas representativas con un buen nivel de confianza operativa. De ahí que el caudal de diseño adoptado para el sistema sea el $Q_{50} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$. Este criterio permite un equilibrio entre eficiencia energética y estabilidad del sistema de forma que el diseño hidráulico no sea demasiado grande.

Con el método de Tennat y considerando un caudal medio anual de 4,71 m³/s, se establecieron los caudales ecológicos mínimos en 0,471 m³/s para la época seca que corresponde al 10% del caudal medio anual, y en 1,413 m³/s para la época lluviosa. Que

equivale al 30%, garantizando la preservación de las funciones ecológicas esenciales del río Ambi y la sostenibilidad del sistema fluvial

Con un caudal medio previsto de $6,27 \text{ m}^3/\text{s}$ en las condiciones planeadas, los volúmenes de flujo ecológico fueron de $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación seca y de $1,88 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación lluviosa. Esto muestra que el régimen ambiental se adapta bien a futuros escenarios hídricos y posibles cambios climáticos, manteniendo el equilibrio entre la conservación del ecosistema y el uso energético.

La aplicación de los caudales ecológicos redujo la disponibilidad de agua. En condiciones normales, esto equivale a $3,82 \text{ m}^3/\text{s}$. En condiciones proyectadas, es de $3,66 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto demuestra que la restricción ambiental no afecta la viabilidad energética del sistema hidroeléctrico. De hecho, permite una operación responsable y sostenible desde el punto de vista ambiental.

Un modelo de predicción basado en redes neuronales detectó cambios en el caudal. El aumento máximo de caudal fue de $9,62 \text{ m}^3/\text{s}$ en diciembre de 2025. El mínimo fue de $1,03 \text{ m}^3/\text{s}$ en julio de 2026. Estos resultados son coherentes con la estacionalidad histórica del régimen hidrológico. También mantienen la dinámica del sistema.

Por lo tanto, se concluye que el uso hidroeléctrico del río Ambi es viable desde el punto de vista técnico y energético, tanto según el análisis histórico como las proyecciones a corto plazo. Sin embargo, esta viabilidad depende de mantener el caudal ecológico y de una gestión operativa eficiente, especialmente en épocas de sequía. El análisis y los estudios realizados confirman el potencial hidroeléctrico sostenible del río Ambi con 1 MW de capacidad instalada, entre 8 y 10 GWh de producción anual, bajo criterios de diseño técnica y ambientalmente responsables. Los resultados obtenidos permiten afirmar la factibilidad técnica

del proyecto y posibilitan el establecimiento de bases para la planeación y optimización en la operación futura de ambas centrales La Algodonera y Atuntaqui.

Este resultado se logró al combinar análisis climatológicos, hidrológicos, energéticos y de predicción. Esto permitió entender mejor cómo funciona el sistema y ayudar en la toma de decisiones para usar el recurso hídrico de manera eficiente y sostenible.

4.2 Recomendaciones

Implementar sistemas de monitoreo permanente del clima y del agua en tiempo real. Estos sistemas registrarán el caudal del río, las precipitaciones y los niveles del río. De esta forma, se fortalecerá la toma de decisiones operativas y el control del recurso hídrico.

Integrar modelos de predicción de lluvias y sequías basados en inteligencia artificial en los sistemas de gestión de operaciones de la empresa. Así se podrá prever las épocas de sequía o de inundación y mejorar la planificación de la generación de electricidad.

Actualizar periódicamente el modelo de lluvias y sequías empleado. Para eso, se incorporarán nuevos datos climáticos, escenarios de cambio climático y modificaciones en el uso del suelo. De esta forma, se podrá tener una representación más realista del comportamiento futuro de la cuenca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, A. S. (2023). Watershed Delineation from DEM by Model Builder in ArcGIS. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9(11), 2796–2805. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-11-011>
- Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria.* (2013). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO.
- Anghel, C. G. (2024). Revisiting the Use of the Gumbel Distribution: A Comprehensive Statistical Analysis Regarding Modeling Extremes and Rare Events. *Mathematics*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/math12162466>
- Banerjee, R. (2016). Importance of Hydro Power. *IJIREEICE*, 4(1), 30–33. <https://doi.org/10.17148/ijireeice.2016.4108>
- Bianucci, P., Sordo-Ward, A., Lama-Pedrosa, B., & Garrote, L. (2024). How do environmental flows impact on water availability under climate change scenarios in European basins? *Science of The Total Environment*, 911, 168566. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168566>
- Campo, J. M., & Boada, M. (2019). *Implementation of a hydrological model to optimize the operation of Baba Hydroelectric Power Plant Implementación de modelo hidrológico para mejora de la operación de la Central Hidroeléctrica Baba.*
- Campos, I., Balbontín, C., González-Piqueras, J., González-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., & Calera, A. (2016a). Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. *Agricultural Water Management*, 165, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.018>

- Campos, I., Balbontín, C., González-Piqueras, J., González-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., & Calera, A. (2016b). Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. *Agricultural Water Management*, 165, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.018>
- Ceran, B., Jurasz, J., Wróblewski, R., Guderski, A., Złotecka, D., & Kazmierczak, Ł. (2020). Impact of the minimum head on low-head hydropower plants energy production and profitability. *Energies*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/en13246728>
- Chau, K. W. (2006). Particle swarm optimization training algorithm for ANNs in stage prediction of Shing Mun River. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 363–367. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.025>
- Chen, X., Li, Q., Jia, Z., Xiao, R., Cheng, Z., & Peng, Y. (2025). Study on the evolution of ecological flow in river and its guarantee degree during different hydrological periods. *Journal of Cleaner Production*, 490. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144761>
- Chen, X., Zhang, L., & Tang, L. (2025). A Practical Method for Ecological Flow Calculation to Support Integrated Ecological Functions of the Lower Yellow River, China. *Water (Switzerland)*, 17(15). <https://doi.org/10.3390/w17152326>
- Deka, P., Cordeiro-Costas, M., Pérez-Orozco, R., Chabiński, M., & Szlęk, A. (2024). *Title Page Article Title: Novel NSGA-II Optimized LSTM and GRU Models for Short-Term Forecasting of Residential Heating Load Author Names.* <https://ssrn.com/abstract=5069807>
- Fang, G., Yan, M., Dai, L., Huang, X., Zhang, X., & Lu, Y. (2023). Improved indicators of hydrological alteration for quantifying the dam-induced impacts on flow regimes in small

- and medium-sized rivers. *Science of The Total Environment*, 867, 161499. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.161499>
- Guo, Y., Yu, X., Xu, Y.-P., Chen, H., Gu, H., & Xie, J. (2020). *AI-based techniques for multi-step streamflow forecasts: Application for multi-objective reservoir operation optimization and performance assessment*.
- Hariadi, M. H., Van Der Schrier, G., Steeneveld, G. J., Sutanto, S. J., Sutanudjaja, E., Ratri, D. N., Sopaheluwakan, A., & Klein Tank, A. (2024). A high-resolution perspective of extreme rainfall and river flow under extreme climate change in Southeast Asia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(9), 1935–1956. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1935-2024>
- Jhong, Y.-D., Chen, C.-S., Jhong, B.-C., Tsai, C.-H., & Yang, S.-Y. (2024). Optimization of LSTM Parameters for Flash Flood Forecasting Using Genetic Algorithm. *Water Resources Management*, 38(3), 1141–1164. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03713-8>
- Jia, W., Chen, M., Yao, H., Wang, Y., Wang, S., & Ni, X. (2024). Improving Sub-daily Runoff Forecast Based on the Multi-objective Optimized Extreme Learning Machine for Reservoir Operation. *Water Resources Management*, 38(15), 6173–6189. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03953-2>
- Kane Anderson Bello Vera. (2024). *Certificación de tutor*.
- Kaunda, C. S., Kimambo, C. Z., & Nielsen, T. K. (2012). Hydropower in the Context of Sustainable Energy Supply: A Review of Technologies and Challenges. *ISRN Renewable Energy*, 2012, 1–15. <https://doi.org/10.5402/2012/730631>
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2019). Flow regime aspects in determining environmental flows and maximising energy production at run-of-river

- hydropower plants. *Applied Energy*, 256, 113980.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113980>
- Li, J., Wu, G., Zhang, Y., & Shi, W. (2024). Optimizing flood predictions by integrating LSTM and physical-based models with mixed historical and simulated data. *Heliyon*, 10(13).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33669>
- Ly, S., Sayama, T., & Try, S. (2023). Integrated impact assessment of climate change and hydropower operation on streamflow and inundation in the lower Mekong Basin. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00586-8>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *COLLEGE OF AGRICULTURE AND LIFE SCIENCES Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*.
- Paish, O. (2002). Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537–556. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0)
- Temtime, G. S. (2024). Flood Frequency Analysis Using Gumbel Distribution Method: A Case of Robigumero River, Abay Basin, Ethiopia. *Hydrology*, 12(1), 1–7.
<https://doi.org/10.11648/j.hyd.20241201.11>
- Tesema, T. A. (2021). Impact of identical digital elevation model resolution and sources on morphometric parameters of Tena watershed, Ethiopia. *Heliyon*, 7(11).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08345>
- Veneros, J., Hansen, A. J., Jantz, P., Noguera-Urbano, E., & García, L. (2025). Forecasting the potential habitat for the spectacled bear and the Páramo ecoregion for current conditions

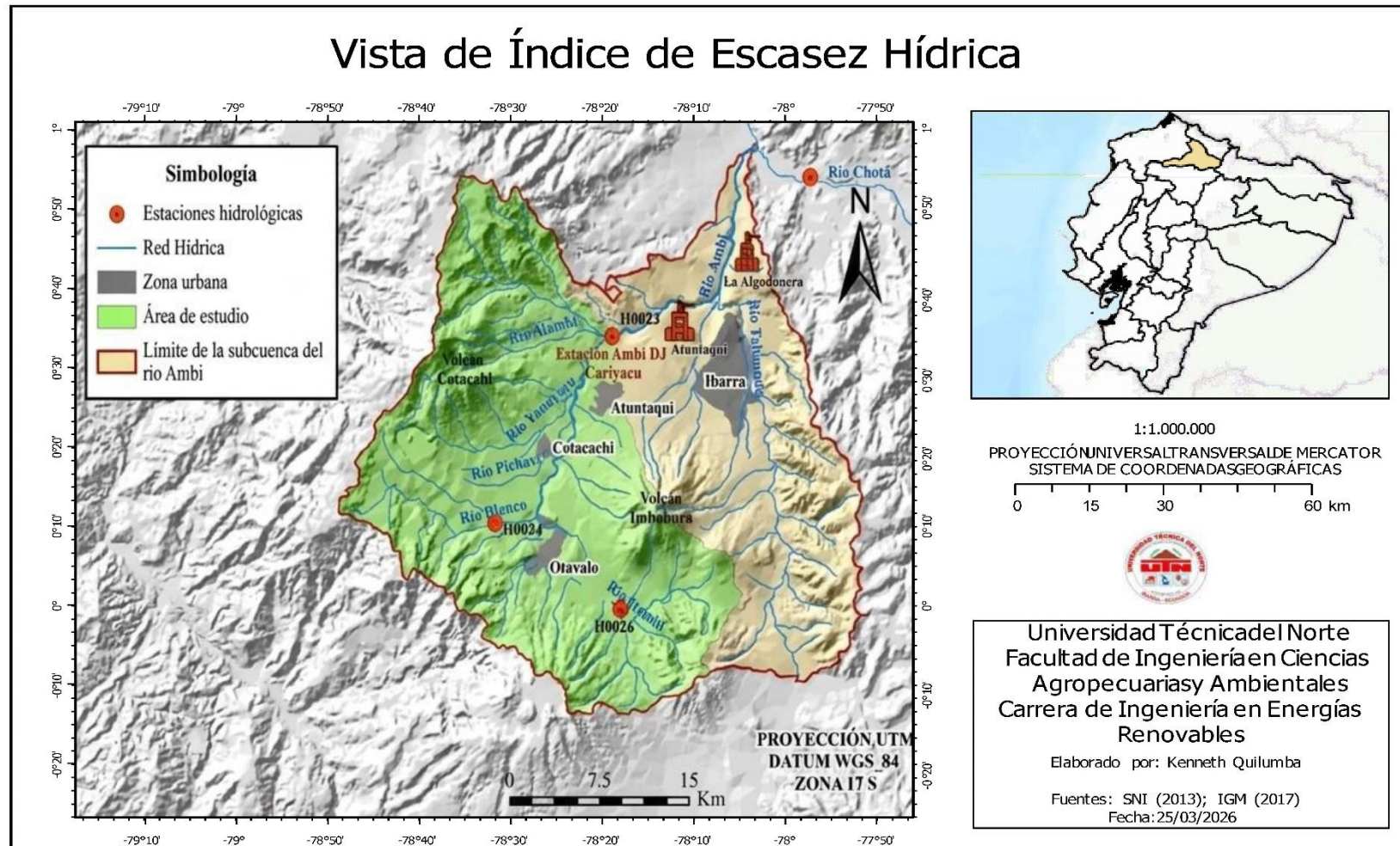
and climate change scenarios in 2050: A contribution to SDG 15 in Perú, Ecuador and Colombia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26.
<https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100639>

Vinicio Carrera-Villacrés, D., Valeria Guevara-García, P., Carolina Tamayo-Bacacela, L., Lucía Balarezo-Aguilar, A., Alfonso Narváez-Rivera, C., & Rosa Morocho-López, D. (2016). *Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media Filling series annual meteorological data by statistical methods in the coastal zone from Ecuador and Andes, and calculation of rainfall* (Vol. 34).

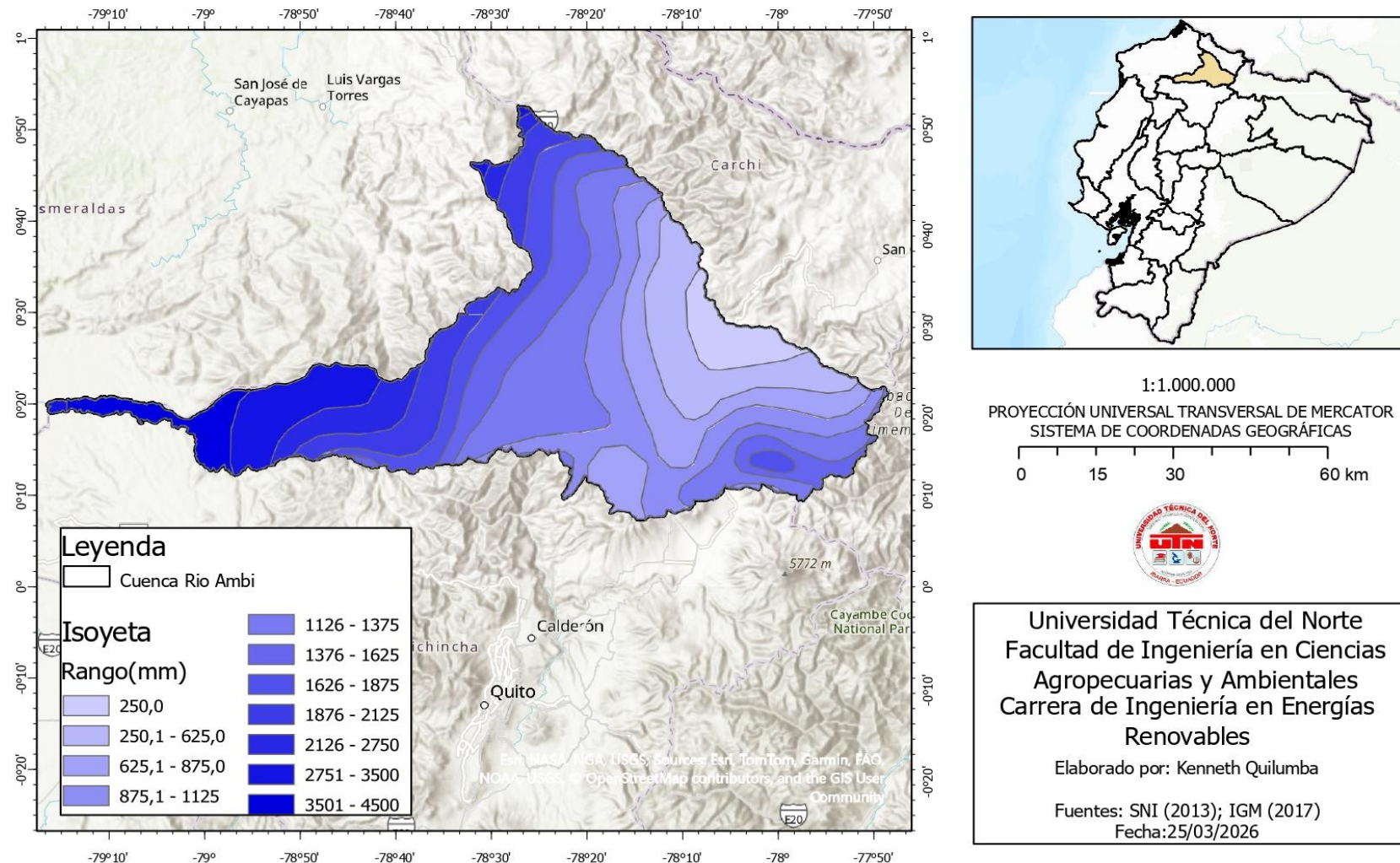
Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijneveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., van Vliet, M. T. H., & Stokal, M. (2024). A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communications*, 15(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>

ANEXOS

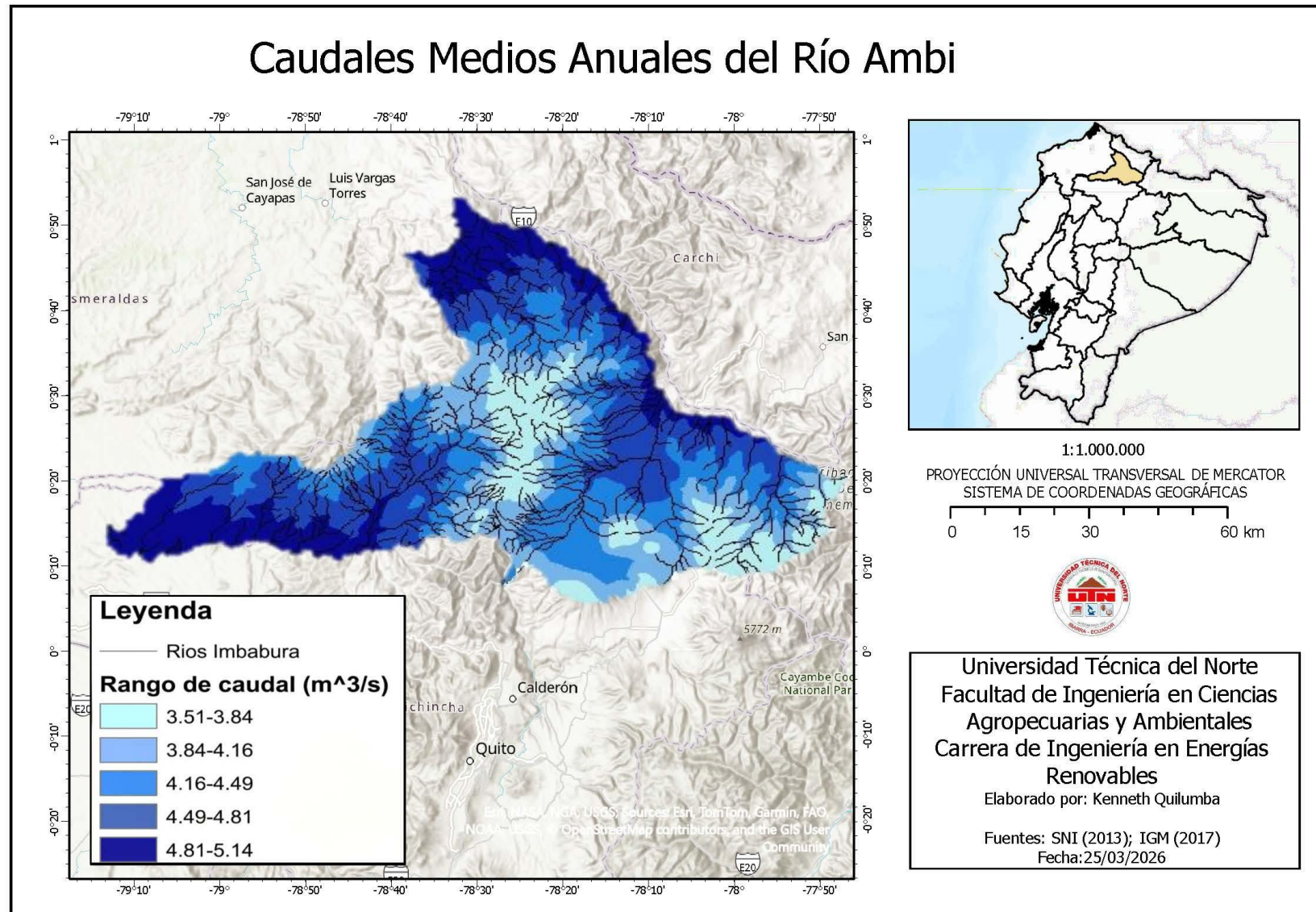
Vista de Índice de Escasez Hídrica



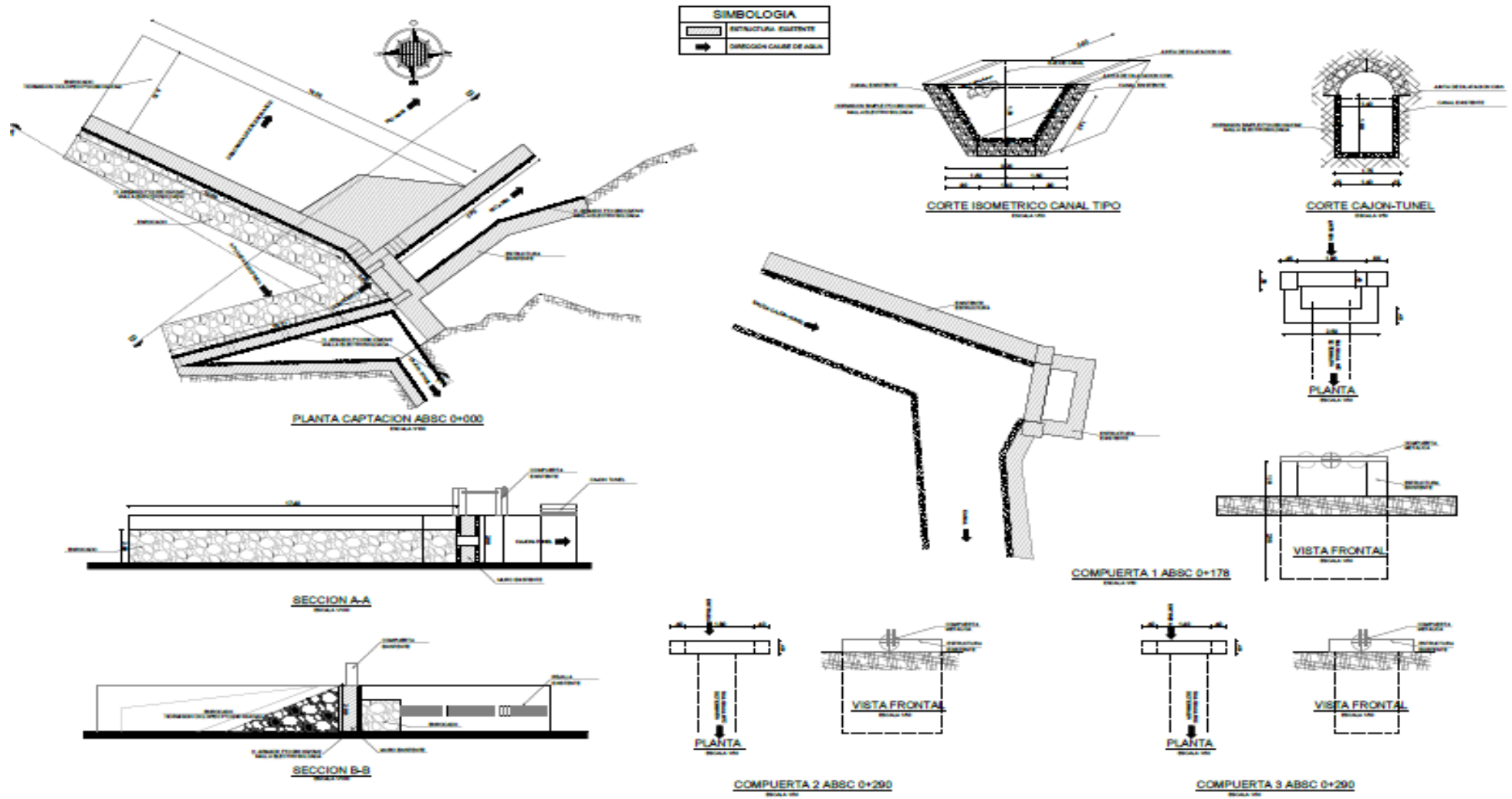
Isoyetas Medias Anuales del Río Ambi



Caudales Medios Anuales del Río Ambi



Laminado de la hidroeléctrica



Mapa de Importancia Hídrica

