

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
ESCUELA DE POSGRADO



TESIS

**ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA DE PASADA TÍPICA DE LA CUENCA
PERUANA PARA MEJORAR SU APROVECHAMIENTO**

**PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN ENERGÉTICA**

**ELABORADO POR
JOSUÉ ELIEZER ALATA REY**

**ASESOR
Dr. LEONARDO FRANCO CASTILLO NAVARRO**

**CO-ASESOR EXTERNO
Dr. NESTOR MONTALVO ARQUIÑIGO**

LIMA – PERÚ
2025

Dedicatoria:

A mi madre Lucia, por todo su sacrificio y dedicación para poder darme un mejor futuro.

A mi esposa Shirley, por su amor y comprensión en todos estos años.

A mis hijos Gregory, Luciana y Jair, quienes me motivan a seguir esforzándome cada día.

JOSUE ALATA

Agradecimiento:

A Dios por la vida, la salud y protección.

A la UNI, al CARELEC y al Ministerio de energía y Minas, por brindarme la oportunidad de seguir estudiando.

A todos mis colegas que me animaron y motivaron en terminar la tesis, sin su ayuda no lo hubiera conseguido.

JOSUE ALATA

ÍNDICE

Resumen – Abstract.....	13
Introducción.....	15
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	17
1.1 Identificación y descripción de problema.....	19
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Hipótesis.....	22
1.4 Antecedentes bibliográficos en estado de arte.....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	26
2.1 Central hidroeléctrica de pasada.....	26
2.2 Análisis energético en central hidroeléctrica de pasada.....	38
2.3 Análisis ecológico en central hidroeléctrica de pasada.....	40
2.4 Caudal ecológico en una central hidroeléctrica de pasada.....	45
2.5 Series temporales y modelos ARIMA.....	51
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE INVESTIGACIÓN.....	66
3.1 Marco metodológico.....	66
3.2 Modelo matemático.....	68
CAPÍTULO IV: ESTUDIO DE CASO.....	73
4.1 Datos de entrada.....	73
4.2 Análisis de información.....	81
4.3 Discusión de resultados.....	181
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	182
5.1 Conclusiones.....	182
5.2 Recomendaciones.....	184
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	185
ANEXOS.....	190

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICA DE FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN	58
TABLA 4.1. DATOS TÉCNICOS C.H. DE EL PLATANAL.....	74
TABLA 4.2. PARTICULARIDADES DE LAS TURBINAS	75
TABLA 4.3. PARTICULARIDADES DE LOS GENERADORES	75
TABLA 4.4. VALORES MÁXIMO, MÍNIMO Y PROMEDIO DE LA DATA	81
TABLA 4.5. CAUDALES DE RIO, TURBINADO Y CORTOCIRCUITADO	87
TABLA 4.6. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	90
TABLA 4.7. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL DE LOS CAUDALES DEL RÍO.....	92
TABLA 4.8. ESTADÍSTICAS DE SERIE CAUDAL DE RÍO.....	94
TABLA 4.9. MODELOS ARIMA DE SERIE CAUDAL DE RÍO.....	97
TABLA 4.10. INDICADORES DE AJUSTE DE LOS MODELOS ARIMA.....	98
TABLA 4.11. ESTIMACIONES DE PARÁMETROS DEL MODELO ARIMA.....	98
TABLA 4.12. PRONÓSTICO DEL CAUDAL DEL RÍO	102
TABLA 4.13. ESTADÍSTICAS DE LA SERIE TURBINADO	104
TABLA 4.14. MODELOS ARIMA DE LA SERIE CAUDAL TURBINADO.....	106
TABLA 4.15. INDICADORES DE AJUSTE DE LOS MODELOS ARIMA.....	106
TABLA 4.16. ESTIMACIONES DE PARÁMETROS DEL MODELO ARIMA.....	107
TABLA 4.17. PRONÓSTICO DEL CAUDAL TURBINADO.....	110

TABLA 4.18. ESTADÍSTICAS DE LA SERIE POTENCIA EFECTIVA.....	112
TABLA 4.19. ESTIMACIONES DE PARÁMETROS DEL MODELO ARIMA.....	115
TABLA 4.20. PRONÓSTICO DE LA POTENCIA EFECTIVA	119
TABLA 4.21. ESTADÍSTICAS DE LA SERIE ENERGÍA GENERADA	121
TABLA 4.22. ESTIMACIONES DE PARÁMETROS DEL MODELO ARIMA.....	123
TABLA 4.23. PRONÓSTICO DE LA ENERGÍA GENERADA.....	127
TABLA 4.24. ESTADÍSTICAS DE LA SERIE FACTOR DE PLANTA.....	129
TABLA 4.25. ESTIMACIONES DE PARÁMETROS DEL MODELO ARIMA.....	131
TABLA 4.26. PRONÓSTICO DE FACTOR DE PLANTA.....	135
TABLA 4.27. ESTACIONES METEOROLÓGICAS	140
TABLA 4.28: PRINCIPALES PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS.....	140
TABLA 4.29: ANÁLISIS DE SALTOS DE LAS PRECIPITACIONES.....	148
TABLA 4.30: COMPLETACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE TANTA.....	150
TABLA 4.31: COMPLETACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE VILCA.....	151
TABLA 4.32: COMPLETACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE YAURICOCHA.....	152
TABLA 4.33: COMPLETACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE CARANIA.....	153
TABLA 4.34: PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL REGIONALIZADA.....	155
TABLA 4.35: PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL PITACOCOA.....	156
TABLA 4.36: PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL PAUCARCOCHA.....	157
TABLA 4.37: TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL.....	158

TABLA 4.38: HUMEDAD RELATIVA MENSUAL.....	159
TABLA 4.39: VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO MENSUAL.....	160
TABLA 4.40: RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO MENSUAL.....	161
TABLA 4.41: COBERTURA VEGETAL PROMEDIO MENSUAL.....	162
TABLA 4.42: MICROCUENCA EN ESTUDIO.....	166
TABLA 4.43: VALORES INICIALES DEL MODELO WEAP.....	169
TABLA 4.44: DATOS PARA LA CURVA ALTITUD-AREA-VOLUMEN.....	170
TABLA 4.45: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE PAUCARCOCHA.....	174
TABLA 4.46: CAUDALES GENERADOS PARA PITACOCOA.....	174
TABLA 4.47: CAUDALES GENERADOS PARA PAUCARCOCHA.....	176
TABLA 4.48: SERIE DE VOLUMENES PARA PAUCARCOCHA.....	177
TABLA 4.49: ENERGÍA NO PRODUCIDA 2016-2023.....	179
TABLA 4.50: CAUDAL DISPONIBLE A PARTIR DEL Q95.....	179
TABLA 4.51: CAUDAL DISPONIBLE A PARTIR DEL AÑO CRITICO.....	180
TABLA 4.52: CAUDAL DISPONIBLE A PARTIR DE PROMEDIOS.....	180
TABLA 4.53: INDICADORES DE MEJORA.....	180

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. ÁRBOL DE PROBLEMAS	20
FIGURA 2.1. TRANSFORMACIÓN ENERGÍA HIDRÁULICA	29
FIGURA 2.2. GRÁFICA REFERENCIAL DE SERIE TEMPORAL	52
FIGURA 2.3. PROCEDENCIA DE SERIE TEMPORAL	53
FIGURA 2.4. TENDENCIAS Y NIVEL DE LA SERIE	54
FIGURA 2.5. RUIDO BLANCO CON MEDIA CERO	56
FIGURA 2.6. GRÁFICOS AUTORREGRESIVOS EN TENDENCIA.....	59
FIGURA 2.7. GRÁFICOS AUTORREGRESIVOS EN ACF Y ACFP	60
FIGURA 2.8. GRÁFICAS MEDIAS MÓVILES EN TENDENCIA.....	61
FIGURA 2.9. GRÁFICAS MEDIAS MOVILES EN ACF ADEMÁS ACFP.....	61
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGIA PLANTEADA	68
FIGURA 4.1. RIO CAÑETE Y DESARENADOR.....	73
FIGURA 4.2. CASA DE MÁQUINAS DE CENTRAL	74
FIGURA 4.3. PANEL DE CONTROL DE CENTRAL	76
FIGURA 4.4. GRUPO TURBINA-GENERADOR DE LA CENTRAL	77
FIGURA 4.5. TURBINA PELTÓN DE LA CENTRAL.....	78
FIGURA 4.6. SALA DE CONTROL DE LA CENTRAL	79
FIGURA 4.7. PATIO DE LLAVES DE LA CENTRAL.....	80
FIGURA 4.8. CAUDAL DEL RÍO VS. TIEMPO USANDO MATLAB	82

FIGURA 4.9. CAUDAL TURB. VS. TIEMPO USANDO MATLAB	82
FIGURA 4.10. POTENCIA VS. TIEMPO USANDO MATLAB.....	83
FIGURA 4.11. ENERGÍA VS. TIEMPO USANDO MATLAB.....	83
FIGURA 4.12. POTENCIA VS. CAUDAL USANDO MATLAB	84
FIGURA 4.13. ENERGÍA VS. CAUDAL USANDO MATLAB	85
FIGURA 4.14. FACTOR DE PLANTA VS. CAUDAL USANDO MATLAB	86
FIGURA 4.15. SERIE TEMPORAL DEL CAUDAL DEL RÍO.....	94
FIGURA 4.16. AUTOCORRELACIONES SIMPLES DE SERIE CAUDAL.....	96
FIGURA 4.17. AUTOCORRELACIONES PARCIALES DE SERIE CAUDAL	97
FIGURA 4.18. GRÁFICO DE RESIDUOS DE MODELO AJUSTADO ARIMA.....	100
FIGURA 4.19. AUTOCORRELACIÓN SIMPLE Y PARCIAL DE RESIDUOS.....	100
FIGURA 4.20. GRÁFICO DE SERIE OBSERVADA Y PRONÓSTICO.....	101
FIGURA 4.21. SERIE TEMPORAL DEL CAUDAL TURBINADO	103
FIGURA 4.22. AUTOCORRELACIONES SIMPLES DE LA SERIE CAUDAL	105
FIGURA 4.23. AUTOCORRELACIONES PARCIALES DE SERIE CAUDAL	105
FIGURA 4.24. GRÁFICO DE RESIDUOS DE MODELO AJUSTADO ARIMA.....	108
FIGURA 4.25. AUTOCORRELACIÓN SIMPLE COMO PARCIAL RESIDUOS	109
FIGURA 4.26. GRÁFICO DE LA SERIE OBSERVADA Y PRONÓSTICO	110
FIGURA 4.27. SERIE TEMPORAL DE LA POTENCIA EFECTIVA.....	112
FIGURA 4.28. AUTOCORRELACIONES SIMPLES DE LA SERIE POTENCIA....	114

FIGURA 4.29. AUTOCORRELACIÓN PARCIAL DE SERIE POTENCIA.....	114
FIGURA 4.30. GRÁFICO DE RESIDUOS DE MODELO AJUSTADO ARIMA.....	116
FIGURA 4.31. AUTOCORRELACIÓN SIMPLE Y PARCIAL DE RESIDUOS.....	117
FIGURA 4.32. GRÁFICO DE SERIE OBSERVADA Y PRONÓSTICO.....	118
FIGURA 4.33. SERIE TEMPORAL DE LA ENERGÍA GENERADA	120
FIGURA 4.34. AUTOCORRELACIONES SIMPLES DE LA SERIE ENERGÍA.....	122
FIGURA 4.35. AUTOCORRELACIONES PARCIALES DE SERIE ENERGÍA.....	120
FIGURA 4.36. GRÁFICO DE RESIDUOS DE MODELO AJUSTADO ARIMA.....	124
FIGURA 4.37. AUTOCORRELACIÓN SIMPLE Y PARCIAL DE RESIDUOS.....	125
FIGURA 4.38. GRÁFICO DE LA SERIE OBSERVADA Y PRONÓSTICO	126
FIGURA 4.39. SERIE TEMPORAL DEL FACTOR DE PLANTA	128
FIGURA 4.40. AUTOCORRELACIONES SIMPLES DE LA SERIE FACTOR	130
FIGURA 4.41. AUTOCORRELACIONES PARCIALES DE SERIE FACTOR.....	130
FIGURA 4.42. GRÁFICO DE RESIDUOS DE MODELO AJUSTADO ARIMA.....	132
FIGURA 4.43. AUTOCORRELACIÓN SIMPLE Y PARCIAL DE RESIDUOS.....	133
FIGURA 4.44. GRÁFICO DE LA SERIE OBSERVADA Y PRONÓSTICO	134
FIGURA 4.45. CUENCA DEL RIO CAÑETE.....	136
FIGURA 4.46. MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA	137
FIGURA 4.47. UBICACIÓN DE LAS MICROCUENCAS	141
FIGURA 4.48. ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA ZONA.....	142

FIGURA 4.49. HIETOGRAMA DE LA ESTACIÓN TANTA.....	144
FIGURA 4.50. HIETOGRAMA DE LA ESTACIÓN VILCA.....	145
FIGURA 4.51. HIETOGRAMA DE LA ESTACIÓN YAURICOCHA.....	145
FIGURA 4.52. HIETOGRAMA DE LA ESTACIÓN CARANIA	145
FIGURA 4.53. DIAGRAMA DE DOBLE MASA CON ESTACIÓN PROMEDIO.....	146
FIGURA 4.54. DIAGRAMA DE DOBLE MASA CON ESTACIÓN BASE	147
FIGURA 4.55. CORRELACIÓN ALTITUD-PRECIPITACIÓN.....	155
FIGURA 4.56. VARIACIÓN POR MES DE TEMPERATURA.....	158
FIGURA 4.57. VARIACIÓN POR MES DE HUMEDAD RELATIVA.....	160
FIGURA 4.58. VARIACIÓN POR MES DE VELOCIDAD DEL VIENTO	161
FIGURA 4.59. VARIACIÓN POR MES DE RADIACIÓN SOLAR	162
FIGURA 4.60. MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE PITICOCHA.....	163
FIGURA 4.61. MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE PAUCARCOCHA.....	163
FIGURA 4.62: ZONAS DE MODELACIÓN DE EMBALSES EN WEAP.....	165
FIGURA 4.63: UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA PITICOCHA.....	166
FIGURA 4.64: UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA PAUCARCOCHA.....	167
FIGURA 4.65: ESQUEMA TOPOLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS.....	168
FIGURA 4.66: CURVA ÁREA-VOLUMEN DE PAUCARCOCHA.....	173
FIGURA 4.67: SERIE CAUDALES GENERADOS PITICOCHA EN 2D.....	175
FIGURA 4.68. SERIE CAUDALES GENERADOS PITICOCHA EN 3D	175
FIGURA 4.69. SERIE CAUDALES PARA PAUCARCOCHA EN 2D.....	176
FIGURA 4.70. SERIE DE CAUDALES PARA PAUCARCOCHA EN 3D.....	177
FIGURA 4.71. VOLÚMENES GENERADOS PARA PAUCARCOCHA.....	178

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Datos de entrada de la central hidroeléctrica de El Platanal.....	190
Anexo 2: Primer artículo indexado relacionado a la tesis.....	193
Anexo 3: Segundo artículo indexado relacionado a la tesis.....	209
Anexo 4: Lineamientos generales para determinar caudales ecológicos.....	219
Anexo 5: Matriz de consistencia.....	223
Anexo 6: Matriz de operacionalización de variables.....	224

RESUMEN

Esta investigación se centra en análisis energético de central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana, con el objetivo de optimizar su aprovechamiento hídrico dentro del contexto de generación de energías renovables en Perú. Análisis fundamenta en recoger información de recurso hídrico de cuenca, funcionamiento central hidroeléctrica, y valoración de indicadores energéticos asimismo ecológicos. Se emplearán recursos de modelado además simulación para estimación de generación de energía a lo extenso de tiempo, llegando a considerar como variable caudal de agua.

Desde el enfoque energético, examina capacidad de producción de central, eficiencia en transformación de energía potencial en electricidad, y aporte al sistema eléctrico nacional. Además, se estudia estabilidad de producción conforme fluctuaciones en caudal de agua, demanda eléctrica además circunstancias climáticas variables.

En términos ecológicos, se evaluarán caudales vinculados con operación de central y probable interferencia con ecosistemas debido al caudal ecológico necesario para mantener el equilibrio ambiental.

Los hallazgos de análisis energético proporcionarán información crucial para toma de decisiones en planeación energética de Perú, y contribuirán al saber científico de integración de centrales hidroeléctricas de pasada en sistemas energéticos más eficientes. En instancia última, el análisis tiene como propósito incentivar desarrollo de fuentes de energía renovables que efectúen compatibilidad con preservación de entorno en cuenca peruana.

ABSTRACT

This research focuses on energy analysis of typical run-of-river hydroelectric plant in Peruvian basin, with the aim of optimizing its water use within context renewable generation energy in Peru. Analysis is based on gathering information on water resource in the basin, operation of the hydroelectric plant, and evaluation both ecological and energy indicators. Modeling and simulation resources used estimate energy generation over time, considering water flow variable.

From an energy perspective, study examines plant's production capacity, efficiency in converting potential energy into electricity, and contribution national electrical grid. Additionally, it assesses the stability of generation in relation to fluctuations in water flow, electricity demand, and varying climatic conditions.

From an ecological standpoint, water flows associated with plant operation will be evaluated, as well as the potential interference with ecosystems due to the ecological flow required to maintain environmental balance.

The findings from the energy analysis will provide crucial information for decision-making in energy planning in Peru and contribute to scientific knowledge on integrating run-of-river hydroelectric plants into more efficient energy systems. Ultimately, the analysis aims promote development of renewable energy sources are compatible preservation of environment in Peruvian basin.

INTRODUCCIÓN

El estudio, titulado "Análisis energético de una central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana para mejorar su aprovechamiento", perteneciente al programa de Doctorado en Ciencias con mención en Energética de la Universidad Nacional de Ingeniería. Se halla estructurado en 4 apartados, asimismo conclusiones e igualmente recomendaciones.

El apartado 1, titulado "Planteamiento del problema", presenta una revisión bibliográfica de artículos científicos además tesis vinculadas con el tema. A partir de estas revisiones, se define problemática de análisis, justificación, propósitos conforme hipótesis formuladas, así como las variables e indicadores requeridos para situar el estudio dentro de metodología adecuada para alcanzar el objetivo propuesto.

El capítulo 2, denominado "Marco Teórico", detalla fundamentos conceptuales que sustentan tema. Se resaltan conceptos clave y conocimientos necesarios para comprender metodología de solución planteada, además de identificar a los autores relevantes en el desarrollo del tema. También se incorporan nuevos conocimientos previamente validados o, en su defecto, citados en las referencias bibliográficas.

En apartado 3, titulado "Desarrollo de investigación", expone metodología asimismo modelo matemático a desarrollar, además elementos que se empleará en análisis, los cuales forman parte de metodología de objeto de análisis.

Apartado 4, "Estudio de caso", presenta análisis de caso donde se aplica modelo matemático y se muestran hallazgos. Estos hallazgos se comparan con los resultados esperados, generando observaciones y consideraciones relevantes.

En la sección de "Conclusiones", se evalúa si la metodología empleada ha resuelto problema, a partir de resultados.

En la sección de "Recomendaciones", se ofrecen sugerencias para mejorar el modelo matemático y se proponen líneas de investigación futura relacionadas con el trabajo realizado en esta investigación.

Finalmente, en la sección de "Referencias bibliográficas", se presentan las fuentes utilizadas, cumpliendo con los requisitos establecidos por el posgrado de la UNI para las tesis de doctorado y siguiendo las normas APA.

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

En los últimos años, la generación de electricidad provenientes de fuentes renovables ha ganado creciente relevancia a nivel mundial. En Perú, la cuenca peruana posee considerable potencial hídrico que se ha aprovechado a través de construcción de centrales hidroeléctricas. Las instalaciones aprovechan flujo natural de ríos sin necesidad de embalses grandes, lo que las transforma en alternativa atractiva a nivel ecológico. Sin embargo, es esencial efectuar análisis energético de las centrales para valorar eficiencia y probables impactos vinculados.

Diversos análisis previos han analizado las centrales hidroeléctricas desde distintos enfoques. Por ejemplo, Smith (2018) llevó a cabo un exhaustivo análisis sobre rendimiento energético de hidroeléctricas en América Latina, resaltando necesidad de valorar eficiencia en generación asimismo disponibilidad de recursos hídricos. No obstante, todavía hay falta de estudio específico sobre centrales hidroeléctricas de pasada en la cuenca peruana, dificultando una comprensión profunda de funcionamiento igualmente posibles efectos en el entorno que podrían generar.

Los hallazgos del análisis serán de gran relevancia para comunidad científica como para responsables de toma de decisiones en los sectores ambiental además energéticos de Perú. Estos hallazgos permitirán a optimizar funcionamiento de centrales hidroeléctricas de pasada en cuenca peruana y ofrecerán información crucial para planeación asimismo gestión sostenible de proyectos futuros hidroeléctricos en región.

En el actual escenario, caracterizado por una mayor conciencia ambiental y la necesidad de encontrar respuestas energéticas sostenibles, energía hidroeléctrica

se posiciona como fuente fundamental para enfrentar retos ambientales asimismo energéticos. En este sentido, centrales hidroeléctricas de pasada, que utilizan flujo de ríos sin requerir represas grandes, han obtenido relevancia como opción viable para generación de energía renovable. En cuenca peruana, conocida por su abundancia de recursos hídricos y su compromiso con expansión de energías limpias, las centrales simbolizan alternativa atractiva. No obstante, para garantizar ejecución sostenible asimismo exitosa, es esencial abordamiento de desafíos ecológicos como energéticos asociados a la tecnología.

En su objetivo de diversificar y hacer más sostenible su matriz energética, Perú ha acrecentado esfuerzos para ampliar colaboración de energías renovables en su mix energético. De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) de Perú, la energía hidroeléctrica es una fuente primordial de producción eléctrica en la nación, simbolizando parte considerable de instalada capacidad. No obstante, producción de energía hidroeléctrica es vulnerable a las alteraciones en flujo de agua, lo que genera incertidumbre sobre estabilidad además confiabilidad de suministro eléctrico durante períodos de sequía o cambios hidrológicos.

El funcionamiento de central hidroeléctrica de pasada se halla directamente ligado a disponibilidad y el flujo de agua en río. Los patrones hidrológicos se afectarían por elementos como cambio climático además tareas humanas en cuenca. Para asegurar estabilidad en producción de energía, es primordial estudiar cómo alteraciones en flujo de agua pueden llegar a influenciar en habilidad de producción de central y su integración con red eléctrica nacional.

1.1 IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA

Investigaciones anteriores, como la de López et al. (2017), han destacado relevancia de predecir el flujo de agua para mejorar la gestión de centrales hidroeléctricas de pasada. En el enfoque ecológico, construcción asimismo operación de estas instalaciones pueden generar efectos en ecosistemas terrestres asimismo acuáticos. Modificación de flujo de agua y las alteraciones en los hábitats pueden influir negativamente en biodiversidad y ciclos naturales de ecosistemas. Asimismo, aplicación de acciones como caudal ecológico, que asegura flujos mínimos requeridos para ecosistema río abajo, plantea retos tanto técnicos como económicos. En este marco, resulta esencial llevar a cabo un análisis integral de la energía en una central hidroeléctrica representativa de cuenca peruana. El estudio debe considerar tanto aspectos técnicos relacionados con obtención de energía y su integración a la red eléctrica, como posibles efectos ambientales asimismo estrategias para reducirlos. El empleo de recursos de modelado asimismo simulación, como se señala en el trabajo de González et al. (2019), puede ofrecer información clave para prever cómo las variaciones hidrológicas y climáticas pueden afectar tanto la producción de energía como los ecosistemas.

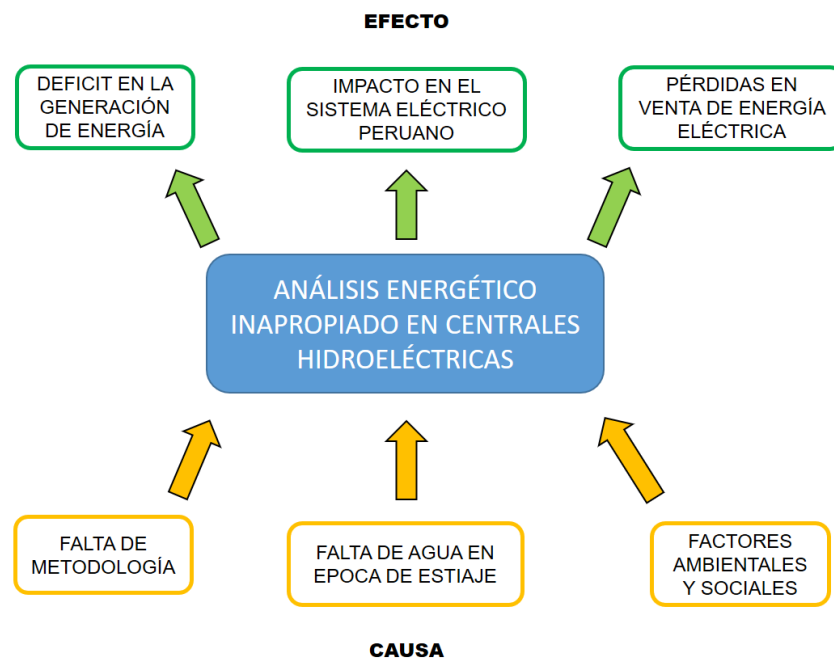


Figura 1.1: Árbol de problemas

FORMULACIÓN DE PROBLEMA

Como formulación de problema general, se posee:

¿Es posible desarrollar análisis energético mediante una propuesta metodológica de una central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana a fin de mejorar su aprovechamiento?

Como establecimiento de problemas específicos, se poseen:

- A. ¿Qué tipo de correlación hay entre caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta en una central hidroeléctrica de pasada durante su operación en un intervalo de tiempo?
- B. ¿Existe correspondencia entre caudal turbinado y caudal ecológico durante la operación de una central hidroeléctrica de pasada?

- C. ¿Qué escenarios alternativos se tendría, si se inyecta agua al sistema de generación de energía eléctrica a través de reservorios naturales?
- D. ¿Cuánta energía adicional se podría producir en época de estiaje, si durante la operación de una central hidroeléctrica se inyecta un volumen de agua proveniente de reservorios?

1.2 OBJETIVOS

Objetivo General:

El objetivo general de la presente tesis doctoral es establecer una metodología de análisis energético de una central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana con fines de mejorar su aprovechamiento.

Objetivos Específicos:

Como objetivos específicos, se detallan:

- A. Establecer la correlación entre el caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta de una central hidroeléctrica de pasada durante su operación en un intervalo de tiempo.
- B. Determinar la correspondencia entre el caudal de turbinado y el caudal ecológico durante operación de una central hidroeléctrica de pasada.
- C. Plantear escenarios alternativos de inyección de agua al sistema de generación de energía eléctrica a través de reservorios naturales.
- D. Cuantificar la energía eléctrica adicional que se podría producir en época de estiaje, si durante la operación de una central hidroeléctrica se inyecta un volumen de agua proveniente de reservorios.

1.3 HIPÓTESIS

Hipótesis General:

El análisis energético a una central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana permite mejorar su aprovechamiento en base a una propuesta metodológica con variable de disponibilidad hídrica.

Hipótesis Específicos:

- A. Existe correlación entre caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta de una central hidroeléctrica de pasada durante su operación en un intervalo de tiempo.
- B. Es posible encontrar correspondencia entre caudal turbinado y caudal ecológico durante la operación de una central hidroeléctrica de pasada.
- C. La inyección de agua a la central hidroeléctrica de pasada a través de los reservorios naturales son una alternativa durante la época crítica de operación de la central.
- D. Es factible cuantificar la energía eléctrica adicional que se podría producir en una central hidroeléctrica durante la época de estiaje, si al momento de operar se inyecta un volumen de agua adicional proveniente de un reservorio.

1.4 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN ESTADO DE ARTE

Diversos investigadores en el ámbito energético han abordado los antecedentes bibliográficos vinculados al análisis de una central hidroeléctrica de pasada típica de cuenca peruana. Estos análisis ofrecen base sólida para entender tanto efectos ambientales como potencial energético de esta clase de infraestructuras dentro del

contexto específico de Perú. A continuación, se detallan algunos de los estudios más relevantes, acompañados de sus citas y referencias bibliográficas correspondientes.

Uno de los estudios más significativos sobre el tema es generado por Rodríguez et al. (2018), los cuales estudiaron potencial de energía hidroeléctrica en Perú. Su investigación incluyó una evaluación de particularidades climáticas asimismo geográfica de la nación, así como disponibilidad de elementos hídricos para producción de energía. Investigadores llegaron a concluir que Perú posee gran potencial para desarrollar centrales hidroeléctricas de pasada, y resaltaron relevancia de llevar a cabo análisis detallado tanto energético como ecológico para valorar viabilidad.

Por su parte Gutiérrez et al. (2016), los cuales efectuaron análisis del ciclo de vida de central hidroeléctrica de pasada en cuenca del río Mantaro, Perú. Este análisis abordó efectos ambientales derivados de construcción, operación asimismo desmantelamiento de central, considerando aspectos como el uso del agua, emisiones de gases de efecto invernadero y producción de residuos. Hallazgos de este estudio brindaron información clave para diseño y gestión sostenible de este tipo de infraestructuras en región.

El análisis de Sánchez et al. (2015) se enfocó en evaluar efectos ambientales de central hidroeléctrica de pasada en cuenca de río Urubamba, en Perú. Utilizando recursos de valoración de efecto ambiental, autores examinaron cómo construcción y operación de central afectarían calidad de agua, biodiversidad y ecosistemas acuáticos. Hallazgos subrayaron necesidad de ejecutar acciones de mitigación además monitoreo ambiental para mermar efectos negativos relacionados con estos proyectos.

El análisis ecológico también ha sido un aspecto central en los estudios sobre hidroeléctricas. Pérez (2019), en análisis "Impacto Ambiental de Centrales Hidroeléctricas en Ecosistemas Fluviales", detalló relevancia de investigar efectos que infraestructuras tienen sobre ecosistemas acuáticos. El autor llegó abordar temas como destrucción de hábitats, alteración de los caudales y probables repercusiones sobre especies acuáticas, proporcionando una perspectiva ecológica para comprender cómo la construcción de hidroeléctricas puede desestabilizar ecosistemas fluviales.

Por otro lado, trabajo de Torres et al. (2013) se enfocó en valorar potencial energético de ríos en Cusco, Perú, para instalación de centrales hidroeléctricas de pasada. Utilizando información hidrológica asimismo tecnologías de producción de energía, autores analizaron capacidad de producción y viabilidad económica de los proyectos. Los hallazgos detallaron que Cusco tiene gran potencial para desarrollo de este tipo de centrales hidroeléctricas, lo cual podría influir considerablemente en matriz energética de la nación.

En síntesis, estudios más relevantes para análisis energético de central hidroeléctrica de pasada en cuenca peruana abarcan investigaciones como las de Rodríguez et al. (2018), Gutiérrez et al. (2016), Sánchez et al. (2015) asimismo Torres et al. (2013). Los análisis aportan información esencial de potencial energético, efectos del entorno asimismo estrategias de mitigación vinculadas con hidroeléctricas en la región.

En conclusión, la principal aportación de esta tesis es:

- Crear una metodología para el análisis energético de central hidroeléctrica de pasada.

- Asegurar producción de energía eléctrica en central hidroeléctrica de pasada típica de cuenca peruana durante la temporada de sequía.
- Garantizar el suministro energético mediante el uso de energías renovables y asegurar el funcionamiento sostenible del suministro de energía.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE PASADA

Las centrales hidroeléctricas de pasada son alternativas para producir electricidad utilizando el flujo continuo de agua en ríos o arroyos. Conforme con Ullah et al. (2021), el tipo de instalaciones aprovecha caídas pequeñas de agua para producir energía de forma sostenible asimismo eficiente. A diferencia de hidroeléctricas convencionales, no requieren grandes represas ni embalses, sino que utilizan el flujo continuo del agua para producir electricidad.

Ramírez et al. (2019) resaltan que estas centrales son una opción atractiva para generar electricidad en áreas remotas o rurales, donde no llega red eléctrica convencional y en el cual el uso de combustibles fósiles para obtención de energía es insostenible y caro. Una de las ventajas primordiales de hidroeléctricas de pasada es su bajo ambiental impacto en cotejo con hidroeléctricas tradicionales, ya que no requieren grandes represas ni embalses, lo que disminuye considerablemente los efectos sociales y ambientales, según Ullah et al. (2021).

Además, estas instalaciones pueden ser más rentables que las hidroeléctricas tradicionales, especialmente en áreas rurales o apartadas que no hallan vinculadas a red eléctrica. Según Ramírez et al. (2019), la generación de electricidad en este tipo de centrales puede resultar competitiva en términos de costos en cotejo con otras fuentes de energía renovable, como eólica o solar.

No obstante, hidroeléctricas de pasada igualmente detallan diversos inconvenientes. Conforme con Según Ullah et al. (2021), poseen dependencia de un flujo continuo de

agua en los ríos o arroyos, lo que las vuelve sensibles a las fluctuaciones climáticas y los cambios en los patrones hidrológicos. Asimismo, construcción de estas instalaciones requiere estudios exhaustivos para evaluar su viabilidad desde los aspectos técnico, económico y ambiental. Ramírez et al. (2019) destacan que se deben analizar factores como el caudal de agua, topografía, calidad del agua, biodiversidad, así como los posibles efectos culturales además sociales de proyecto.

En conclusión, centrales hidroeléctricas de pasada representan opción interesante además sostenible para generar electricidad en áreas rurales o apartadas. A pesar de diversos desafíos técnicos, ambientales además económicos, su bajo efecto ambiental y rentabilidad, especialmente en cotejo con otras fuentes de energía renovable, las hacen alternativa valiosa para áreas con acceso limitado a red eléctrica clásica. Además, estas instalaciones pueden combinarse con otras fuentes de energía renovable, como solar o eólica, lo que mejora la eficiencia y sostenibilidad en la producción de electricidad. Conforme con Ullah et al. (2021), integración de diversas fuentes renovables puede mermar dependencia de combustibles fósiles y reforzar seguridad energética en regiones rurales o remotas.

Centrales hidroeléctricas de pasada pueden generar beneficios para las comunidades locales, tales como la creación de empleo y la mejora en calidad de vida de los residentes. Conforme con Ramírez et al. (2019), elaboración además operación de este tipo de proyectos puede producir empleos en zona y facilitar acceso a servicios fundamentales como electricidad y agua potable.

No obstante, es necesario considerar que construcción de estas infraestructuras puede generar efectos negativos en diversas comunidades. Conforme con Ullah et al. (2021), creación de central hidroeléctrica de pasada podría impactar en

biodiversidad asimismo hábitats de especies tanto acuáticas como terrestres, además de alterar las costumbres y los medios de vida de las comunidades cercanas.

Por lo tanto, es fundamental realizar procesos de consulta y participación ciudadana durante las fases de planificación y construcción del proyecto. Según Ramírez et al. (2019), la participación comunitaria puede ser clave para identificar y mitigar posibles impactos negativos, promoviendo así la sostenibilidad tanto social como ambiental del proyecto.

En cuanto a la tecnología utilizada, existen diversas alternativas y diseños para centrales hidroeléctricas de pasada. Conforme con Ullah et al. (2021), los primordiales tipos son centrales de canal, derivación igualmente de presa baja. Centrales de canal son más usuales, ya que desvían una parte del flujo del río hacia tubería que lleva el agua hasta turbina. Centrales de derivación, en cambio, emplean una estructura para redirigir el agua hacia la turbina. Por último, centrales de presa baja emplean presa para almacenar cantidad definida de agua, que luego se emplea para producir electricidad.

En conclusión, centrales hidroeléctricas de pasada son opción sostenible además interesante para generar electricidad en áreas rurales o remotas. A pesar de algunos retos técnicos, ambientales, económicos asimismo sociales, su bajo efecto ambiental, rentabilidad además capacidad de integración con otras fuentes de energía renovable las hacen alternativa interesante en lugares con acceso limitado a red eléctrica clásica. Estas centrales se caracterizan por aprovechamiento de energía de masa de agua a cierta altura, convirtiéndola en electricidad. Este proceso consiste en conducir el agua desde su nivel original hacia un nivel inferior, donde las turbinas

hidráulicas, movidas por el agua, giran los generadores para producir electricidad, como se ilustra en figura 2.1.

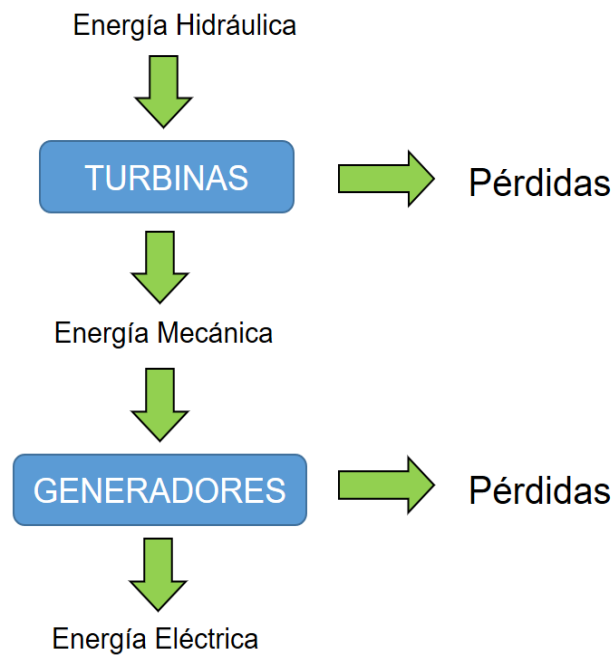


Figura 2.1: Transformación energía hidráulica en energía eléctrica

2.1.1. ELEMENTOS DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE PASADA:

Centrales hidroeléctricas de pasada aprovechan flujo natural de un río para producir electricidad sin necesidad de grandes depósitos de agua. Se caracterizan por tener un almacenamiento limitado y un caudal constante, diferenciándose de centrales con embalse. Correspondientemente, se describirán elementos primordiales de central hidroeléctrica de pasada, resaltando su relevancia en generación de energía renovable igualmente limpia.

Embalse de regulación:

A comparación de centrales con embalse, las de pasada no necesitan enormes reservorios de agua. No obstante, algunos proyectos incluyen pequeños embalses de regulación que estabilizan caudal y garantizan flujo continuo de agua hacia la central. Los embalses llegan actuar como almacenaje temporal y permiten ajustar producción de energía conforme las variaciones de demanda. Conforme Smith (2018), embalse de regulación es esencial para optimizar el rendimiento de una central hidroeléctrica de pasada.

Toma de agua:

Es el punto donde se capta el caudal del río para redirigirlo hacia la central. Está ubicada aguas arriba de embalse de regulación y se diseña para extraer el agua necesaria sin afectar negativamente ecosistema fluvial. Conforme con González (2019), correcta localización igualmente diseño de toma de agua son primordiales para asegurar flujo continuo asimismo prevenir problemas como sedimentación o obstrucción de equipos.

Canal de conducción:

Es el medio por el cual el agua se transporta desde toma hasta la turbina. Este puede ser tubería presurizada o canal abierto, dependiendo de las condiciones geográficas del sitio. Su diseño debe garantizar una eficiencia hidráulica óptima y minimizar las pérdidas por fricción. Según López (2021), un canal de conducción bien diseñado es crucial para mejorar eficiencia energética de central.

Grupo turbina y generador:

La turbina es elemento primordial de central hidroeléctrica de pasada, ya que transforma energía cinética de agua en mecánica al pasarla por sus álabes. La energía mecánica se convierte luego en electricidad a través del generador. Elección de la turbina posee dependencia de caudal igualmente altura de caída de agua. Conforme con Rodríguez (2020), turbinas Francis igualmente Kaplan son más usuales en centrales de pasada, por acrecentada eficiencia igualmente capacidad de adaptación a diferentes condiciones operativas.

Vertedero de descarga:

Regula exceso de agua que no se usa para generar energía, ayudando a equilibrar la producción eléctrica con la protección del ecosistema acuático. Según Martínez (2017), un diseño adecuado del vertedero es vital para prevenir problemas como la erosión o el socavamiento en la zona aguas abajo, garantizando la seguridad del sistema.

Componentes de central hidroeléctrica de pasada deben trabajar en conjunto para aprovechamiento de forma eficiente y sostenible la energía del agua. Elementos como toma de agua, embalse de regulación, turbina y generador, canal de conducción y vertedero de descarga son esenciales para la generación de energía limpia y renovable. Comprender estos componentes es crucial para diseñar y operar exitosamente central hidroeléctrica.

2.1.2. VARIABLES DE OPERACIÓN:

POTENCIA INSTALADA:

Elemento primordial en diseño y planeación de central hidroeléctrica de pasada. Este parámetro detalla capacidad de producción eléctrica de central y es esencial para valorar viabilidad económica asimismo económica. Correspondientemente, se explorarán los aspectos y elementos más relevantes vinculados con potencia instalada de central hidroeléctrica de pasada, resaltando relevancia de realizar un análisis detallado y preciso.

Caudal del río:

Elemento primordial que llega influir de forma directa en potencia instalada de una central hidroeléctrica de pasada. Es vital analizar tanto caudal promedio como máximo disponible durante el año para detallar capacidad de producción de energía. Como indica Smith (2018), caudal continuo además apropiado es primordial para asegurar producción de energía eficiente además estable.

Altura de caída:

Distinguida igualmente como salto de agua o desnivel, representa diferencia de altura entre nivel de agua río arriba y río abajo de la central. El factor es crucial para determinar presión y energía potencial de agua, lo que impacta directamente en potencia producida. Conforme con García (2015), un mayor desnivel está asociado con una acrecentada potencia instalada, siempre que acate con requerimientos técnicos como económicos apropiados.

Eficiencia de la turbina:

Es un aspecto crucial para detallar potencia situada de central de pasada. Las turbinas transforman energía cinética de agua en mecánica, y su rendimiento se halla vinculado al diseño además tipo de turbina utilizada. Conforme con Johnson (2021), elegir turbina eficiente es fundamental para acrecentar instalada potencia y optimizar generación de energía.

Previo de definir instalada potencia, es requerido efectuar análisis de factibilidad exhaustivos que analicen potencial hidroeléctrico del sitio. Estos análisis abarcan análisis hidrológicos, evaluaciones topográficas, estimaciones de caudal y demás variables sobresalientes. Conforme con Brown (2017), los análisis de factibilidad proporcionan datos precisos que permiten detallar potencia instalada ideal y valorar viabilidad de proyecto.

Los requerimientos regulatorios como normativos igualmente son cruciales al definir potencia instalada de central hidroeléctrica de pasada. Dependiendo de región o el país, pueden existir limitaciones sobre la potencia máxima permitida, además de regulaciones ambientales y otras normativas legales. Según Martínez (2019), es esencial cumplir con estas normativas para asegurar sostenibilidad además viabilidad de proyecto.

Potencia instalada es elemento clave en diseño igualmente planeación de central hidroeléctrica. Evaluar con precisión elementos como caudal del río, altura de caída además eficiencia de turbinas es vital para indicar capacidad de producción de energía. Asimismo, análisis de factibilidad y acatamiento de las normativas son primordiales para asegurar éxito y viabilidad de proyecto.

La potencia instalada se refiere a potencia nominal de grupos generadores de la central. En el caso de central hidroeléctrica de pasada, potencia se estima mediante fórmula correspondiente:

$$P = \gamma \times Q \times H \quad (1)$$

Considerando el rendimiento de los equipos electromecánicos, la tubería y las pérdidas en el sistema, la conversión de unidades, expresión que permite estimar instalada potencia de una central queda definida por la siguiente expresión:

$$P = 8.217937 \times Q \times H \quad (2)$$

Donde, γ es peso específico del agua (kg/m^3), Q es caudal nominal (m^3/s) y H es altura (m).

ENERGÍA GENERADA:

Aspecto primordial en funcionamiento de central hidroeléctrica de pasada. Es principal entender igualmente valorar cantidad de electricidad que puede generar central para indicar eficiencia además capacidad de suministro. Correspondientemente, se examinarán factores que influyen en producción de energía en central hidroeléctrica de pasada, así como su efecto en producción energética.

Caudal del río:

Elemento decisivo en cantidad de energía que una central de pasada puede generar. Conforme con Smith (2019), caudal impacta de forma directa en capacidad de generación de energía, ya que un caudal mayor ayuda aprovechar más energía

hidráulica. Evaluar el caudal del río a lo extenso del año es crucial para apreciar con precisión cantidad de energía que se podrá generar.

Altura de caída:

Igualmente, denominada como salto de agua o desnivel, es otro factor esencial en producción de energía en la central. Conforme con Johnson (2022), altura mayor de caída aumenta energía potencial disponible, lo que puede mejorar de forma significativa obtención de electricidad. Analizar y optimizar esta altura es fundamental para maximizar la eficiencia en obtención de energía.

Eficiencia de la turbina:

Desarrolla un rol primordial en cantidad de energía obtenida en central hidroeléctrica de pasada. Turbinas transforman energía hidráulica en mecánica y luego en eléctrica. Conforme con García (2020), elegir turbina eficiente es clave para asegurar una mayor producción de energía y optimizar eficiencia general de sistema.

Aprovechamiento de recurso hídrico:

Una gestión adecuada de recurso hídrico es esencial para obtención de energía en central hidroeléctrica. Esto incluye regulación de caudal del río, gestión de flujos de agua igualmente optimización de altura de caída. Conforme con Brown (2018), integral enfoque para aprovechar el elemento hídrico puede asegurar acrecentada obtención de energía igualmente empleo sostenible de agua.

Mantenimiento y operación:

Mantenimiento habitual y eficiente operación de elementos de central afectan directamente cuantía de energía producida. Conforme con Martínez (2021), contar con programa de mantenimiento apropiado y operar de manera eficiente turbinas y

otros equipos son esenciales para optimizar disponibilidad asimismo eficiencia de central, lo que se llega a traducir en acrecentada obtención de energía eléctrica.

En conclusión, cuantía de energía generada en central hidroeléctrica de pasada depende de diversos elementos, como caudal de río, altura de caída y eficiencia de turbinas. Además, un manejo adecuado del recurso hídrico y una apropiada operación además mantenimiento de los equipos son cruciales para maximizar producción de energía, asegurar eficiencia y sostenibilidad de sistema. La generación de energía en estas centrales se calcula considerando estos factores clave:

$$E = P \times t \quad (3)$$

En el cual, P es Potencia (kW), t es tiempo (h)

FACTOR DE PLANTA:

En ámbito de obtención de energía hidroeléctrica, factor de planta es un indicador crucial para evaluar rendimiento igualmente eficiencia de central hidroeléctrica de pasada. El parámetro mide el lapso en el cual la central trabaja a su capacidad máxima y ha sido objeto de numerosos estudios por parte de expertos en energía e ingeniería.

Conforme con Fernández et al. (2015), en su investigación "Evaluación del Factor de Planta en Centrales Hidroeléctricas de Pasada", el factor de planta es fundamental para analizar producción de energía hidroeléctrica a lo extenso del tiempo. En las centrales de pasada, este elemento se halla estrechamente relacionado con circunstancias hidrológicas y variabilidad de caudal del agua en río, lo que llega influir

de forma directa en eficiencia operativa y en generación de energía durante un período determinado.

El factor de planta proporciona una visión clave sobre el uso de instalada capacidad de la central hidroeléctrica. Un factor de planta elevado detalla que central está operando cerca de máxima capacidad durante períodos prolongados, lo que refleja eficiente operación. En cambio, un factor de planta bajo detalla que central no se encuentra aprovechando todo su potencial, lo cual podría ser causado por restricciones en caudal del agua o problemas técnicos.

Es relevante señalar que factor de planta no únicamente impacta producción de energía, igualmente planeación energética además gestión de demanda eléctrica. Conforme con Smith y Rodríguez (2018), en su análisis "Implicaciones de Factor de Planta en Estabilidad de Red Eléctrica", un factor de planta alto en central hidroeléctrica puede beneficiar fijeza de red eléctrica, debido a que energía hidroeléctrica es más predecible además de controlable en cotejo con diversas fuentes intermitentes, como eólica y solar.

Se concluye, el factor de planta de central hidroeléctrica de pasada es un parámetro primordial para valorar su eficiencia operativa y producción de energía a lo extenso del tiempo. Los estudios de Fernández et al. (2015) igualmente Smith y Rodríguez (2018) destacan relevancia de tener en cuenta ese factor en planeación energética y gestión de red eléctrica. Comprender impacto y relevancia de factor de planta en operación de central hidroeléctrica es primordial para gestionar de manera sostenible y eficiente los recursos energéticos e hídricos.

El factor de planta se calcula dividiendo potencia media (P_m) creada por la planta en un lapso determinado entre potencia instalada (P_{inst}) de la central.

$$F_p = \frac{P_m}{P_{inst}} \quad (4)$$

2.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE PASADA

Análisis energético de central hidroeléctrica de pasada es fundamental para valorar habilidad para transformar energía hidráulica en electricidad. Conforme con Almeida et al. (2021), este análisis permite estimar cuantía de energía que se puede obtener partiendo de caudal del arroyo o río, así como eficiencia de turbinas igualmente generadores eléctricos.

Primero, es crucial comprender que energía hidráulica se emplea para hacer que giren las turbinas en central de pasada. Conforme con Velasco et al. (2019), esta energía se estima multiplicando la densidad de agua, caudal de arroyo o río igualmente altura de caída de agua, denominada como altura neta. Esta última se computa desde superficie del agua en entrada de la tubería hasta salida de la misma.

Una vez determinada la energía hidráulica disponible, se procede a su conversión en electricidad. Según Almeida et al. (2021), este proceso implica una transformación termodinámica en la que energía potencial del agua se convierte primero en energía cinética y luego en eléctrica.

En central de pasada, el agua es dirigida empleando una tubería hacia la turbina. Energía hidráulica se transforma en cinética en la turbina, lo que provoca giro del eje de generador eléctrico. Conforme con Velasco et al. (2019), eficiencia de esta transformación posee dependencia de diversos elementos, como diseño igualmente tecnología de turbina además generador, velocidad de agua en tubería y carga eléctrica acoplada al sistema.

El rendimiento energético es un concepto esencial para valorar eficiencia de central hidroeléctrica de pasada. Conforme con Almeida et al. (2021), se refiere a vinculación entre energía eléctrica producida por central y energía hidráulica disponible en arroyo o río. Este rendimiento se mide en puntaje porcentual y es crucial para determinar efectividad con que se convierte la energía hidráulica en eléctrica.

Aparte de esta métrica, existen otras variables que ayudan a medir eficiencia de central. Velasco et al. (2019) destacan que factores como potencia hidráulica, potencia eléctrica, factor de carga, factor de utilización igualmente factor de capacidad también son importantes para evaluar la habilidad de la central para obtención de electricidad de forma confiable asimismo continua.

En conclusión, realizar un análisis energético de la central de pasada es primordial para valorar su capacidad de convertir energía hidráulica en eléctrica. Este análisis ayuda a conocer cantidad de energía que se puede originar con el caudal disponible del arroyo o río, así como eficiencia de turbinas igualmente generadores. Rendimiento energético y demás variables proporcionan una visión integral de la eficiencia y capacidad de la central.

Además de la evaluación energética, es crucial considerar otros elementos que impactan generación de energía. Conforme con Almeida et al. (2021), entre los factores se encuentran variabilidad de caudal del arroyo o río , calidad de agua y mantenimiento de equipos. La variabilidad del caudal es especialmente importante, ya que, como indican Velasco et al. (2019), la cantidad de agua disponible puede fluctuar conforme temporada, clima y demás elementos del entorno. Por ello, es esencial valorar esta variabilidad para comprender la capacidad de la central para generar energía de forma confiable a lo largo del tiempo.

La calidad del agua también desempeña un papel clave en la eficiencia de la central. Conforme con Almeida et al. (2021), calidad del agua afecta tanto eficiencia de generadores asimismo turbinas, como durabilidad de equipos. Por lo tanto, es necesario valorar calidad del agua para determinar si se deben implementar medidas de protección o tratamiento.

Por último, mantenimiento y operación de equipos son factores fundamentales para la producción de energía. Velasco et al. (2019) subrayan que un mantenimiento adecuado y una operación eficiente son esenciales para asegurar que la central funcione con la máxima eficiencia posible. Establecer un plan de mantenimiento adecuado es vital para garantizar que los equipos operen de forma óptima.

En resumen, el análisis energético es fundamental para evaluar la eficiencia de una central hidroeléctrica de pasada en la conversión de energía hidráulica en electricidad. También es importante tener en cuenta otros factores, como la variabilidad del caudal, la calidad del agua y el mantenimiento de los equipos, ya que todos influyen en la producción de energía. Evaluar estos aspectos es clave para optimizar eficiencia asimismo fiabilidad de la central, garantizando una generación de electricidad sostenible e igualmente constante.

2.3. ANÁLISIS ECOLÓGICO EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE PASADA

Análisis ecológico de una central hidroeléctrica de pasada es crucial para valorar su efecto ambiental. Según Lopes et al. (2018), este análisis facilita el estudio de efectos que la elaboración además operación de la central pueden tener sobre ecosistemas terrestres igualmente acuáticos en las proximidades.

Uno de los efectos primordiales de una central es alteración de caudal del arroyo o río. Conforme con Lopes et al. (2018), elaboración de central puede modificar el flujo de estos cuerpos de agua, lo que podría tener consecuencias perjudiciales para la flora y fauna local. Evaluar este impacto es esencial para indicar si se deben aplicar acciones de mitigación para reducir efectos sobre el entorno natural.

Otro efecto relevante es modificación de hábitat acuático. Lopes et al. (2018) destacan que construcción además operación de la central pueden transformar este hábitat, fragmentando el río o arroyo, alterando el régimen de flujo y afectando calidad de agua. Es primordial valorar este efecto para definir si es necesario tomar acciones de mitigación que protejan biodiversidad y ecosistemas acuáticos contiguos.

Conjuntamente de efectos sobre ecosistemas acuáticos, una central hidroeléctrica de pasada igualmente puede afectar ecosistemas terrestres circundantes. Conforme con Lopes et al. (2018), elaboración además operación de la central pueden alterar el paisaje, causar pérdida de hábitat y modificar el régimen hidrológico. Valorar este impacto es crucial para identificar si se deben implementar acciones de mitigación que salvaguarden biodiversidad y ecosistemas terrestres en la zona.

En resumen, llevar a cabo un análisis ecológico de central hidroeléctrica de pasada es fundamental para comprender su efecto ambiental. Los efectos sobre medio ambiente pueden ser significativos, por lo que deben evaluarse detenidamente para reducir los negativos impactos y resguardar tanto biodiversidad como ecosistemas circundantes.

Además de efectos sobre caudal de río, hábitat acuático asimismo ecosistemas terrestres, una central hidroeléctrica de pasada igualmente afectaría calidad de agua. conforme González et al. (2020), construcción asimismo operación de la central

pueden modificar parámetros como temperatura, turbidez y concentración de oxígeno disuelto en el agua, lo cual impacta la calidad hídrica. Evaluar este efecto es esencial para indicar si se deben tomar medidas protectoras para mantener calidad de agua y salud de ecosistemas acuáticos contiguos.

Otro efecto relevante es emisión de gases de efecto invernadero. González et al. (2020) destacan que elaboración además operación de la central pueden originar emisiones de gases como dióxido de carbono y metano. Es clave analizar este impacto para comprender su contribución al cambio climático y explorar formas de reducir estas emisiones.

Más allá de los impactos ambientales directos, la central hidroeléctrica de pasada también puede poseer consecuencias socioeconómicas en colectividades cercanas. Conforme con González et al. (2020), su construcción y funcionamiento pueden afectar sectores económicos locales, como la seguridad alimentaria, la pesca y el turismo. Es crucial estudiar estos impactos para decidir si se deben implementar medidas que atenúen los efectos negativos sobre medios de vida igualmente calidad de vida de poblaciones cercanas.

En conclusión, es primordial efectuar análisis ecológico de central para valorar su efecto tanto en entorno como en comunidades locales. Efectos de la central pueden ser importantes igualmente deben ser cuidadosamente valorados para mitigar impactos negativos y resguardar biodiversidad, ecosistemas y medios de vida locales.

El efecto social además económico de una central es crucial para evaluar sostenibilidad igualmente viabilidad a plazo largo. De acuerdo con González et al. (2020), elaboración y funcionamiento de la central pueden generar efectos

significativos en las comunidades cercanas, influyendo en sus fuentes de ingreso, la seguridad alimentaria y su calidad de vida.

Un efecto particularmente primordial es modificación de medios de vida. González et al. (2020) detallan que elaboración además operación de central puede afectar tareas locales como agricultura igualmente pesca, lo que podría perjudicar economía local y seguridad alimentaria. Valorar los efectos es primordial para indicar si se deben adoptar acciones de merma para resguardar medios de vida igualmente calidad de vida de colectividades próximas.

Otro efecto significativo es transformación de paisaje y turismo. Conforme con con González-Sánchez et al. (2020), elaboración de central hidroeléctrica de pasada puede alterar belleza natural de la zona, mermando atractivo turístico. Esto tendría efectos negativos para economía local como para calidad de vida de comunidades. Es primordial valorar efectos para detallar acciones de mitigación que permitan proteger medios de vida y calidad de vida en la región.

Además de efectos sobre comunidades locales, centrales hidroeléctricas de pasada igualmente pueden producir efectos socioeconómicos a nivel nacional como regional. Conforme con Stojadinovic et al. (2021), construcción además operación de las centrales puede poseer efecto primordial en economía más amplia, como generación de puestos de labores, producción de ingresos fiscales y merma de sometimiento a combustibles fósiles. Valorar los efectos es primordial para comprender cómo contribuye central al desarrollo sostenible y para detallar maneras de optimizar beneficios socioeconómicos a nivel nacional como regional.

En síntesis, es primordial efectuar valoración exhaustiva de efecto económico y social de central hidroeléctrica de pasada para indicar viabilidad asimismo sostenibilidad a

plazo largo. Efectos que pueda poseer en comunidades locales son significativos, por lo que deben ejecutarse acciones para mermar probables perjuicios y resguardar calidad de vida de las comunidades. Asimismo, es requerido indicar efectos socioeconómicos a nivel nacional igualmente regional para maximizar beneficios además aportar a desarrollo sostenible.

Más allá de efectos económicos y sobre medios de vida, construcción además actividad de central hidroeléctrica de pasada igualmente puede influenciar en cultura igualmente patrimonio de comunidades contiguas. Conforme con Sánchez et al. (2021), elaboración de central podría llegar afectar lugares de valor patrimonial además cultural, como lugares arqueológicos o zonas naturales protegidas. Valorar el efecto es primordial para indicar si se deben tomar acciones de protección para preservación de patrimonio cultural de comunidades.

Otro elemento primordial de impactos socioeconómicos es generación de empleo y producción de ingresos. Conforme con Amoako et al. (2019), construcción además actividad de central puede producir empleos indirectos y directos a nivel regional, así como brindar ingresos fiscales al Estado. Valorar los efectos es requerido para comprender cómo aporta la central a economía nacional asimismo regional.

Asimismo, construcción de la central hidroeléctrica de pasada puede representar riesgos para salud además seguridad de comunidades próximas. Conforme con Sánchez et al. (2021), actividad de central puede producir peligros como exposición a contaminación de agua e igualmente aire, asimismo de acrecentar peligro de accidentes. Es primordial valorar los riesgos para ejecutar acciones de resguardo apropiadas para comunidades locales.

En conclusión, valorar efecto social además económico de una central de pasada es primordial para asegurar viabilidad asimismo sostenibilidad a plazo largo. Efectos en medios de vida, cultura, economía, empleo, salud, seguridad y patrimonio de comunidades locales deben ser analizados de forma cuidadosa para mermar efectos negativos además maximizar beneficios socioeconómicos e igualmente culturales que la central pueda producir.

2.4. CAUDAL ECOLÓGICO EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA PASADA

Caudal ecológico es una concepción primordial en gestión de agua, que hace referencia a cuantía de agua requerida para sostener procesos ecológicos igualmente servicios ambientales que un río brinda. En la situación de centrales hidroeléctricas de pasada, caudal involucra cuantía de agua que debe ser liberada río abajo para resguardar ecosistema acuático y beneficios del entorno que produce. El aspecto es primordial para gestión de hidroeléctricas de pasada, ya que cualquier alteración de caudal puede afectar de forma significativa biodiversidad, calidad de agua igualmente disponibilidad de elementos hídricos para colectividades contiguas.

Conforme con Vezzani et al. (2021), indicar caudal ecológico apropiado en central hidroeléctrica es proceso complicado que abarca valoración de diversos elementos, como biodiversidad local, calidad de agua igualmente empleos de agua en la región. Definición de caudal debe ser efectuada por medio de enfoque integral y participativo, que abarque totalidad de partes interesadas, como colectividades locales, autoridades del ambiente igualmente operadores de central.

La operación de central hidroeléctrica de pasada puede poseer efecto relevante sobre caudal ecológico, lo que llegaría afectar a su vez biodiversidad igualmente calidad de agua río abajo. Conforme con Vezzani et al. (2021), operación podría

mermar cuantía de agua disponible para empleos locales, como riego o suministro de agua potable, igualmente alteraría biodiversidad local al modificar flujo, temperatura y calidad de agua.

Es primordial indicar caudal ecológico apropiado para resguardar biodiversidad, calidad de agua y preservar disponibilidad de elementos hídricos para comunidades contiguas. Vezzani et al. (2021) resaltan que el proceso debe efectuarse con enfoque participativo asimismo integral, considerando empleos locales de agua como biodiversidad y calidad de agua.

Asimismo, proceso de indicar caudal ecológico debe ser dinámico, adaptarse a circunstancias cambiantes de ecosistema acuático. Conforme con Vezzani et al. (2021), la determinación debe revisarse de forma periódica para valorar efectividad asimismo efectuar ajustes requeridos que aseguren sostenibilidad a plazo largo de central hidroeléctrica.

En síntesis, caudal ecológico es elemento primordial en administración de centrales hidroeléctricas de pasada. La determinación debe fundamentarse en enfoque integral y colaborativo que considere intereses de totalidad de partes involucradas, como comunidades locales, autoridades ambientales y operadores de central. Asimismo, el proceso debe adaptarse y flexible a modificaciones de ecosistema acuático para resguardar sostenibilidad de central hidroeléctrica de pasada a plazo largo.

Caudal ecológico, que se define como cuantía de agua que debe fluir río abajo para sostener ecosistema acuático igualmente servicios ambientales que brinda, es fundamental en operación de centrales hidroeléctricas de pasada. Conforme con García et al. (2021), caudal ecológico tiene impacto significativo en biodiversidad,

calidad del agua igualmente disponibilidad de elementos hídricos para colectividades cercanas.

Caudal ecológico es primordial para preservar la salud de los ecosistemas acuáticos y servicios ambientales que ofrecen. Conforme con García et al. (2021), la actividad de central puede alterar este caudal y, como consecuencia, afectar biodiversidad igualmente calidad de agua en las zonas río abajo. Es crucial definir caudal ecológico apropiado para resguardar biodiversidad como calidad de agua, asegurando sostenibilidad a largo plazo de central.

Asimismo, caudal ecológico puede influir en disposición de agua para colectividades cercanas. De acuerdo con García-Asorey et al. (2021), operación de central podría mermar cantidad de agua disponible para actividades como el riego, ingesta humana y otros empleos locales. Por lo tanto, detallar caudal ecológico apropiado vital para asegurar que recursos hídricos sigan estando disponibles para comunidades locales y prevenir probables problemáticas por empleo de agua.

Determinar el caudal ecológico correcto para una central hidroeléctrica de pasada es una tarea compleja que implica evaluar diversos factores, como biodiversidad local, calidad de agua y empleos de agua en la zona. García-Asorey et al. (2021) destacan que esta determinación debe seguir enfoque integrado y participativo, involucrando en totalidad de partes interesadas, incluidas comunidades locales, ambientales y operadores de central.

El caudal ecológico se refiere a cantidad de agua que debe mantenerse en un río o curso de agua para asegurar bienestar de ecosistema acuático y preservar naturales procesos hidrológicos. Esta agua se reserva puntualmente para preservar

ecosistemas asimismo mantener calidad de agua, en lugar de destinarla a otros usos como consumo humano, industria o agricultura.

Es relevante destacar que caudal ecológico desempeña un papel clave en la gestión sostenible del agua, ya que los ecosistemas acuáticos son especialmente vulnerables a cambios en cantidad y calidad de agua. Construcción de presas, extracción de agua para otros fines y otros factores pueden alterar flujo natural de agua, lo que convierte a la implementación de caudales ecológicos en una herramienta esencial para la conservación de la biodiversidad acuática.

En conclusión, caudal ecológico es un elemento crucial que debe considerarse al evaluar y operar central hidroeléctrica de pasada. Definir caudal ecológico apropiado es primordial para protección de biodiversidad, calidad de agua igualmente disponibilidad de elementos hídricos para comunidades. Implicar a totalidad de partes interesadas en definición de ecológico caudal aseguran enfoque integral además participativo, maximizando así beneficios tanto ambientales como socioeconómicos de central hidroeléctrica de pasada.

CAUDAL DE UN RIO:

Caudal corresponde a cantidad de agua que circula por un específico punto en intervalo de tiempo puntual. Por lo general, se manifiesta en unidades de volumen por unidad de tiempo, como litros por segundo (l/s) o metros cúbicos por segundo (m^3/s). Para calcular caudal, se pueden emplear diversas metodologías, dependiendo de los datos disponibles y particularidades del sistema. Algunos de los métodos más utilizados son:

- Medición directa: Se utilizan instrumentos como molinetes, flujómetros o correntómetros, para medir velocidad de corriente en varios puntos del río. Los datos se combinan con sección transversal de río para determinar caudal.
- Método de la flotación: Enfoque emplea objetos flotantes, como troncos o boyas, para estimar velocidad de corriente. Al medir tiempo que demora un objeto en transitar distancia conocida, se estima velocidad y, después, caudal.
- Modelos matemáticos: Aplican modelos hidráulicos junto con información de particularidades de río, como rugosidad, pendiente asimismo sección transversal, para simular conducta hidrodinámica además estimar caudal. Los modelos necesitarían información adicional, como datos topográficos y de empleo de suelo.

Es primordial resaltar que estimación precisa de caudal puede ser complicado, debido a que flujo de agua puede verse afectado por elementos como estacional, variabilidad, represas o interacción con otros afluentes. En ciertas situaciones, puede ser necesario implementar un monitoreo constante de caudal a lo extenso de tiempo para conseguir estimaciones más precisas.

MÉTODOS PARA CALCULAR EL CAUDAL ECOLÓGICO:

Caudal ecológico es elemento esencial en diseño asimismo actividad de las centrales hidroeléctricas de pasada, ya que asegura preservación de ecosistema acuático, funciones y protección de vida acuática además hábitats. Correspondientemente, se describirán métodos utilizados para estimar caudal ecológico en este tipo de instalaciones, resaltando su relevancia y aspectos clave a tomar en consideración.

Enfoque Basado en Hábitats:

Un método empleado para estimar caudal ecológico en centrales hidroeléctricas de pasada. De acuerdo con Rodríguez (2017), el método llega a considerar necesidades puntuales de distintos hábitats acuáticos y especies en río. Para ello, examinan particularidades físicas asimismo biológicas de cada hábitat con propósito de detallar caudal requerido para preservación.

Enfoque Basado en Especies:

Se enfoca en requerimientos de especies acuáticas que habitan el río. De acuerdo con López (2020), el método analiza requerimientos de caudal específicos para cada especie, teniendo en cuenta aspectos como caudal necesario para migración, reproducción asimismo alimentación. Para ello, se efectúan análisis biológicos y ecológicos de las especies con el fin de definir ecológico caudal apropiado.

Enfoque Basado en Regímenes Hidrológicos:

Enfoque fundamentado en regímenes hidrológicos emplea datos históricos de caudal del río para indicar caudal ecológico. Conforme con Gómez (2019), este método examina patrones de flujo igualmente alteraciones estacionales de caudal para identificar mínimos caudales requeridos para sostener ecológicos procesos esenciales. Su objetivo es replicar variabilidad natural de caudal en operación de central.

Particularidades de Ecosistema:

Es fundamental considerar particularidades de ecosistema acuático, como diversidad de especies, áreas protegidas igualmente hábitats sensibles, al estimar caudal

ecológico. Martínez (2021) destaca que comprensión de estructura igualmente función de ecosistema es clave para indicar caudales requeridos para preservación.

Evaluación de Impacto Ambiental:

Desarrolla papel crucial en determinación de caudal ecológico. Conforme con Torres (2018), el proceso analiza probables efectos de central hidroeléctrica en ecosistema acuático y brindará información necesaria para indicar caudal ecológico apropiado. Se toman en cuenta impactos sobre especies, hábitats y procesos ecológicos.

Estimación de caudal ecológico es primordial para asegurar conservación de ecosistema acuático en las centrales hidroeléctricas de pasada. Métodos fundamentados en especies, hábitats además regímenes hidrológicos ayuden a indicar caudales requeridos para preservar vida acuática igualmente hábitats. Asimismo, es esencial indicar particularidades de ecosistema y llevar a cabo valoración del efecto ambiental para definir caudal ecológico pertinente.

2.5. SERIES TEMPORALES Y MODELOS ARIMA

Teoría de series temporales y modelos ARIMA son fundamentales en este estudio. Según Carrillo y Tapia (2023), el propósito es aplicar teoría de procedimientos estocásticos para identificar qué proceso ha generado serie temporal en cuestión, con propósito de particularizar su comportamiento y realizar predicciones futuras. Para obtener metodologías de predicción estables, no se puede emplear proceso estocástico cualquiera, sino que es requerido que su estructura probabilística sea constante a lo largo del tiempo.

2.5.1 SERIES TEMPORALES

Conjunto de visualizaciones de variable efectuadas de manera secuencial en tiempo, donde orden de las observaciones es crucial. Las valoraciones de serie temporal están asociados a momentos específicos del tiempo, por lo que análisis de serie abarca trabajar con dos variables: la variable de interés y el tiempo. Series pueden poseer diferentes periodicidades, como anual, por 6 meses, 3 meses, mes, entre otros., poseyendo dependencia de intervalos de tiempo en donde se registra la información.

Análisis de series temporales incluye una serie de técnicas estadísticas que no solo permiten analizar asimismo modelar comportamiento de un evento a lo extenso del tiempo, sino también hacer pronósticos sobre valores que se conseguirán en futuro.

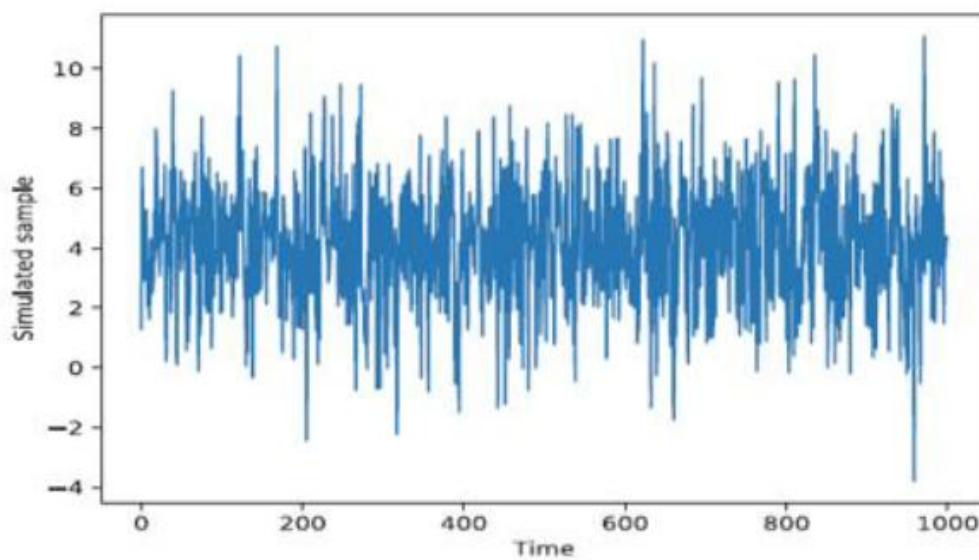


Figura 2.2: Gráfica referencial de una serie temporal

Una serie temporal concebida dentro de un lapso muestral que representa únicamente una parte de historia de proceso estocástico del cual proviene. Por esta

razón, en práctica, análisis de series temporales se lleva a cabo con conglomerado limitado de datos, mientras que modelos teóricos se desarrollan basándose en el proceso estocástico relacionado, ya que suponen cantidad infinita de observaciones.

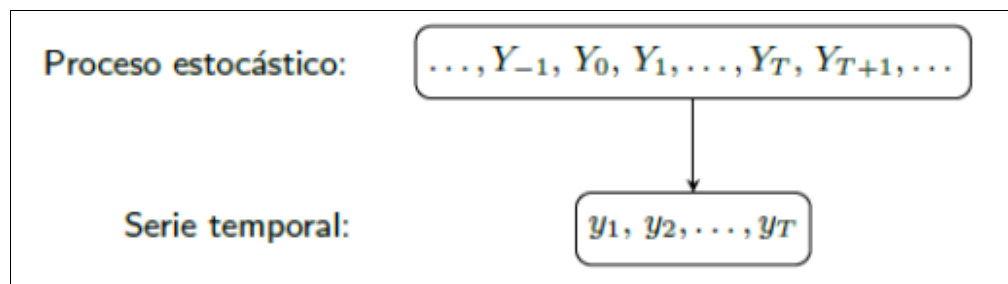


Figura 2.3: Procedencia serie temporal

2.5.1.1. ANÁLISIS PRELIMINAR DE SERIE

Preliminar Análisis de una serie es el primer paso al analizar una serie temporal. Esta etapa ayuda identificar particularidades más relevantes de la serie, como tendencia (decreciente o creciente), la presencia de ciclos, valoraciones atípicas, entre otros.

La forma más simple de iniciar análisis es por medio representación gráfica. El tipo de gráfico utilizado para series temporales es gráfico de secuencia, que consiste en diagramas de líneas donde tiempo se simbolizar en eje horizontal (x) y la variable que se estudia a lo largo del tiempo se coloca en el eje vertical (y).

2.5.1.2. ELEMENTOS DE SERIE TEMPORAL

Análisis de series temporales llega a considerar que serie está compuesta por varios elementos:

A) TENDENCIA Y NIVEL DE SERIE

Nivel de una serie es medida de tendencia central local, como media, para cada lapso considerado. Cuando se trabaja con calendario (lapso representado en días, meses o años), no es aconsejable definir lapsos artificiales para analizar esa particularidad.

Posteriormente de estimar nivel de la serie, se debe evaluar estabilidad, es decir, comprobar si medida de tendencia central seleccionada posee valores consistentes a lo largo de los periodos del calendario. También se debe analizar su tendencia, observando si manifiesta dirección continua de cambio en el nivel.

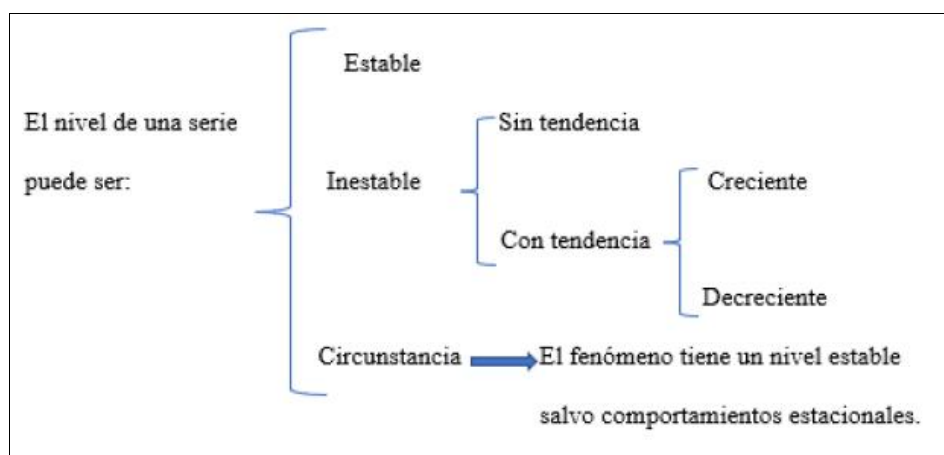


Figura 2.4: Tendencias y nivel de serie

B) ESTACIONALIDAD

Una serie se considera estacional cuando presenta patrón sistemático que se repite de manera periódica (por ejemplo, cada año, mes, entre otros., dependiendo de unidades de tiempo en las que se recopila información).

C) DEPENDENCIA ENTRE VARIABILIDAD Y NIVEL

Si variabilidad de una serie no posee dependencia de nivel, significa que elementos de serie se conciertan de manera aditiva. En otras palabras, acrecentamiento causado por estacionalidad es constante, independientemente de si existe una tendencia decreciente o creciente. Por otro lado, si variabilidad y nivel se hallan relacionados, elementos de serie se conciertan de manera multiplicativa, lo que implica que acrecentamiento por estacionalidad agranda o merma según tendencia creciente o decreciente.

D) RUIDO BLANCO

En una serie temporal, el ruido blanco se considera un proceso estocástico estacionario en donde observaciones en momentos diferentes son independientes y tienen una distribución de probabilidad común. Las principales características del ruido blanco en series temporales son: independencia, media constante, varianza constante y distribución normal.

En otras palabras, ruido blanco es un caso básico de procesos estocásticos, en el que valores son idénticamente e independientes distribuidos a lo extenso de tiempo, con varianza constante además media cero, y se representa por ϵ_t .

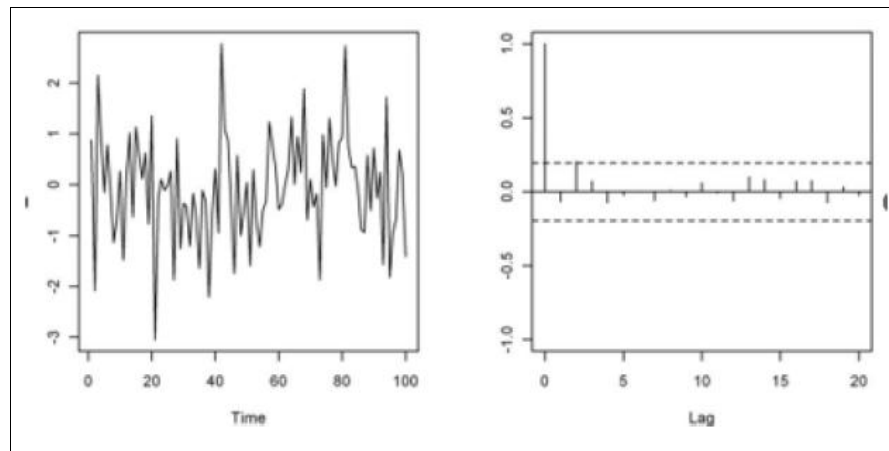


Figura 2.5: Ruido blanco con media cero asimismo varianza constante además igual a 1

E) COMPORTAMIENTO ANÓMALO

Si una serie temporal presenta valores faltantes (cuando no se han registrado datos en un momento específico) o valores atípicos, no se deben pasar por alto. Comportamientos anómalos pueden manifestarse de 3 formas: cambios en tendencia, aumentos repentinos en el nivel o la aparición de valores inusuales.

2.5.2. MODELOS A EMPLEAR PARA PREDICCIÓN DE SERIES TEMPORALES

Análisis asimismo descomposición de serie temporal ahora empleará modelos para predecir series temporales. Tendencia y la estacionalidad jugarán rol clave en predicción y entrenamiento de modelos; algunos modelos poseerán mayor sensibilidad y manejarán mejor estacionalidad y/o tendencia, mientras que otros las pasarán por alto o incluso afectarán negativamente las predicciones.

2.5.3. MODELOS ARIMA

Los modelos paramétricos buscan simbolizar serie temporal en conforme relación temporal entre elementos. Esta clase de modelos, que describen series como diferencias o sumas, ya sean ponderadas o no, de variables aleatorias o de series resultantes, fueron propuestos por Yule y Slutsky en década de 1920. Sirvieron de base para el desarrollo de procesos de medias móviles asimismo autorregresivos, que experimentaron gran avance posterior de publicación en 1970 de libro de Box-Jenkins sobre modelos ARIMA. Análisis en estos modelos se fundamentan en una estructura explícita. Modelos reciben nombre genérico de ARIMA (AutoRegresive Integrated Moving Average), que proviene de 3 componentes: AR (Autorregresivo), I (Integrado) asimismo MA (Medias Móviles).

Identificar un modelo implica usar los datos recopilados y cualquier dato sobre cómo se generó serie temporal en análisis, con propósito de proponer un conglomerado reducido de probables modelos que se ajusten bien a datos. Para serie temporal empírica, es necesario hallar valores más adecuados de (p, d, q) .

- En primer lugar, se debe determinar si la variable temporal requiere una transformación para suprimir no estacionariedad, tanto en la media (p) como en varianza (heteroscedasticidad). Puede ser útil aplicar logaritmos a serie o usar conversión de Box-Cox.
- Además, es importante detallar grado de diferenciación apropiado. Generalmente, la escases de estacionariedad se refleja en que coeficientes de función de autocorrelación estimada disminuyen de forma muy lenta.

Luego, se debe detallar valores de (p, q) , y si hay elemento estacional, determinar órdenes de operadores estacionales (P, Q) . Para el proceso, se emplean funciones

de autocorrelación (ACF) igualmente autocorrelación parcial (ACFP), conforme cuadro correspondiente:

Tabla 2.1 Característica de función de autocorrelación

Proceso	Función de autocorrelación (ACF)	Función de autocorrelación parcial (ACFP)
MA(q)	Solo los q primeros coeficientes son significativos. El resto se anulan bruscamente (coef. 0 para retardo >q)	Decrecimiento rápido exponencial atenuado u ondas sinusoidales.
AR(p)	Decrecimiento rápido exponencial atenuado u ondas sinusoidales.	Solo los p primeros coeficientes son significativos. El resto se anulan bruscamente (coef. 0 para retardo >q)
ARIMA (p, d, q)	Comportamiento irregular en los retardos (1,...,q) con q picos. Decrecimiento para retardos posteriores a q.	Decrece (aproximadamente con exponenciales atenuados y ondas sinusoidales). No cero pronto.

2.5.4. MODELOS AUTORREGRESIVOS AR(p)

Modelo autorregresivo AR detalla un tipo específico de proceso en donde observaciones en un instante determinado se pueden predecir partiendo de visualizaciones anteriores del proceso, más un término de error. La circunstancia más básica es ARIMA (1,0,0), también conocido como AR (1) o de primer orden, cuya fórmula matemática es:

$$AR(p) = C + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \epsilon_t \quad (5)$$

En el cual:

$\Phi_1 \dots \Phi_p$	parámetros de modelo.
c	constante.
ϵ_t	ruido blanco.
X_t	variable vinculada con lapso previo.

Proceso autorregresivo de orden en parte pura se describe de manera que Y_t posee dependencia únicamente de valores pasados. En otras palabras, Y_t es función de sus propios rezagos.

$$Y_t = \alpha + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \epsilon_t \quad (6)$$

En el cual:

Y_{t-1}	rezago de serie.
β_1	coeficiente de rezago que estima modelo.
α	término de intersección.

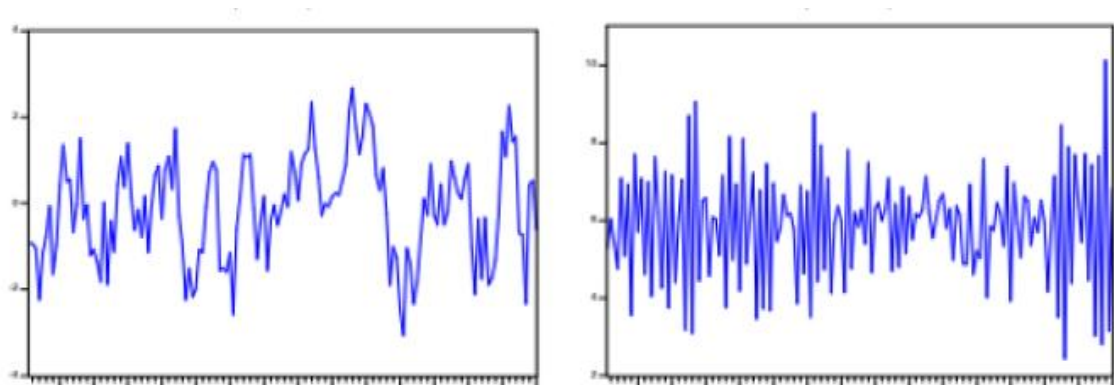


Figura 2.6: Gráficos Autorregresivos en margen de tendencias

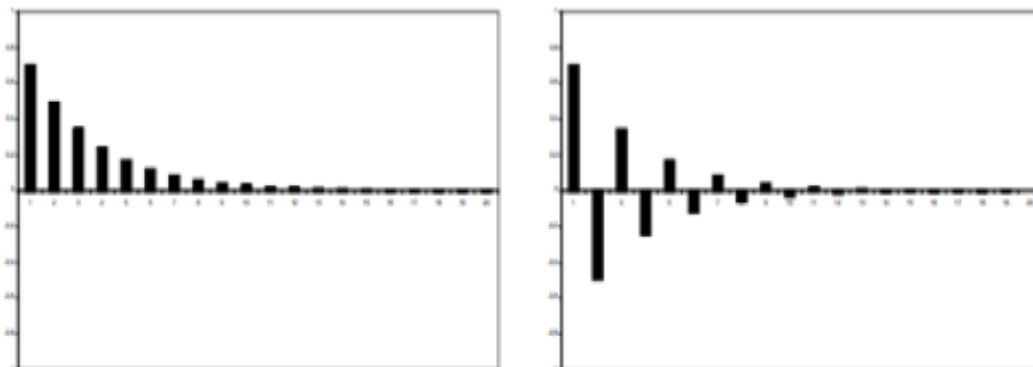


Figura 2.7: Gráficos Autorregresivos en margen de ACF asimismo ACFP

2.5.5. MODELO DE MEDIAS MÓVILES MA(q)

Modelo de medias móviles (MA) representa serie temporal estacionaria. En ese tipo de modelo, actual valor se anuncia partiendo de elemento aleatorio presente y, en inferior medida, de impulsos aleatorios previos. El modelo ARIMA (0, 0, 1), también conocido como MA(1), se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$MA(q) = \sum_{i=1}^q \phi_i \epsilon_{t-i} + \epsilon_t \quad (7)$$

Donde:

$\phi_1 \dots \phi_p$ parámetros de modelo.

ϵ_t ruido blanco.

ϵ_{t-1} términos de error.

Procedimiento para media móvil de orden en parte pura se simboliza términos de error son errores de modelos autorregresivos de correspondientes rezagos.

$$Y_t = \alpha + \epsilon_t + \phi_1 \epsilon_{t-1} + \phi_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \phi_q \epsilon_{t-q} \quad (8)$$

En el cual:

Y_t rezago de serie.

ε_{t-q} errores de serie.
 α término de intersección.
 Φ_p parámetros de modelo.

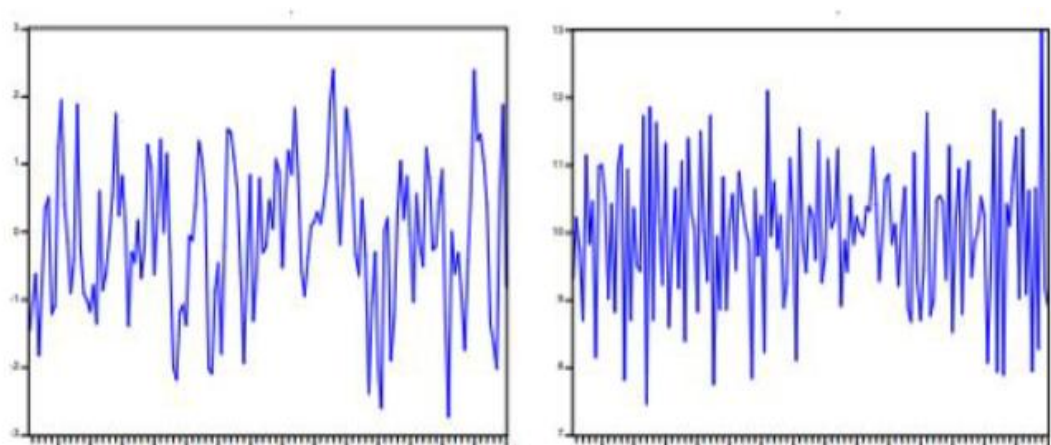


Figura 2.8: Gráficas Medias Móviles en margen de tendencia

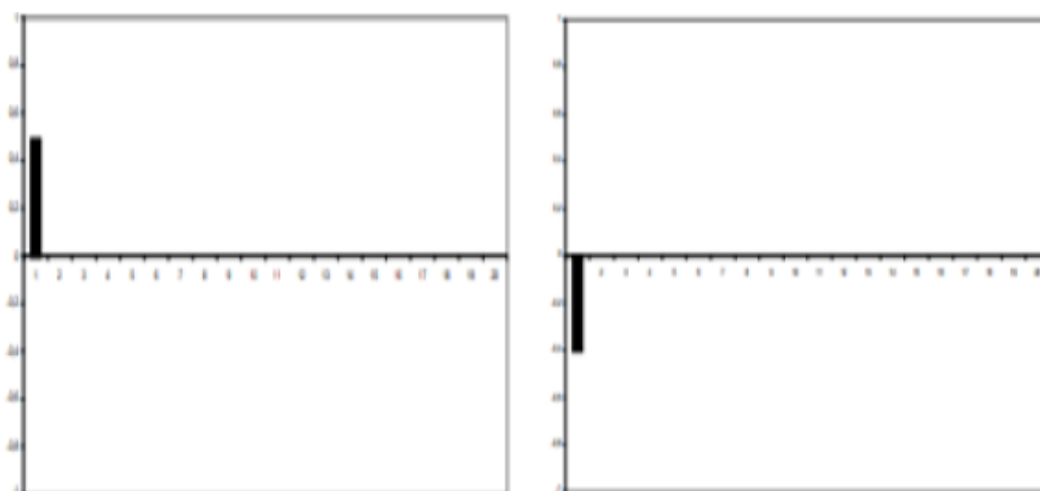


Figura 2.9: Gráficas medias móviles en margen de ACF asimismo ACFP

2.5.6. MODELOS ARMA (p, q)

Modelo que constituido por 2 partes: autorregresiva (AR), y parte de media móvil (MA). Normalmente modelo se detalla de pertinente forma:

$$ARMA(p, q) = \sum_{i=1}^q \phi_i \epsilon_{t-i} + \epsilon_t + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \epsilon_t \quad (9)$$

En el cual:

- $\phi_1 \dots \phi_p$ parámetros de modelo.
- ϵ_t ruido blanco.
- ϵ_{t-1} términos de error.
- X_t variable vinculada con lapso previo.

En el que p es parámetro, u orden, que pertenece a AR y q al MA, donde modelo ARMA es igualmente proceso estacionario; en otras palabras que, si modelo no lo es, es requerido laborar en serie diferenciada.

$$Y_t = \alpha + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \phi_1 \epsilon_{t-1} + \phi_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \phi_q \epsilon_{t-q} \quad (10)$$

Donde:

- Y_t Predicción
- α corresponde a constante.
- $\beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p}$ combinación lineal de retraso de Y.
- $\phi_1 \epsilon_{t-1} + \phi_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \phi_q \epsilon_{t-q}$ combinación lineal de errores de pronóstico retrasado.

2.5.7. MODELOS ARIMA (p, d, q)

Al Modelo ARMA se le incorpora un elemento adicional, conocido como la parte integrada, que especifica cuántas diferencias se requieren para alcanzar la

estacionariedad. Si no es necesario aplicar ninguna diferencia, modelo se reduce simplemente a un ARMA. Notación de modelo ARIMA se define mediante:

$$ARIMA(p, d, q)$$

Por lo tanto, si es requerido diferenciar una serie de tiempo d veces para lograr que sea estacionaria, posteriormente se le aplica un modelo $ARMA(p, q)$, se puede afirmar que original serie de tiempo sigue un modelo $ARIMA(p, d, q)$. Esto significa que se trata de serie de tiempo autorregresiva integrada de medias móviles, en el cual: p representa cantidad de términos autorregresivos, d indica cantidad de veces que la serie debe diferenciarse para alcanzar la estacionariedad, que corresponde a cantidad de términos de medias móviles.

El modelo ARIMA funcionará correctamente si se cumple la condición de estacionariedad. En caso contrario, será necesario transformar datos para poder utilizar ARIMA. Modelo $ARIMA(p, d, q)$ se define como:

$$ARIMA(p, d, q) = (\Delta^d Y_t - Y_t) + \phi_0 + \sum_{i=1}^q \phi_i \epsilon_{t-i} + \epsilon_t + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \epsilon_t \quad (11)$$

Donde:

$(\Delta^d Y_t - Y_t) + \phi_0$	“d” diferencias necesarias para efectuar serie en estacionaria.
ϕ_0	corresponde a constante.
$\sum \phi_i \epsilon_{t-i} + \epsilon_t$	parte de media móvil (MA).
$\sum \phi_i X_{t-i} + \epsilon_t$	parte autorregresiva (AR).

2.5.8. METODOLOGÍA MODELO ARIMA

Se centra en intentar identificar modelo probabilístico que gobierna comportamiento de proceso a través del tiempo. Es importante destacar en ese punto distinción entre

modelo y proceso. Un proceso puede entenderse como la realidad, es decir, el fenómeno en sí mismo, cuyo elemento generador desconocemos. Por otra parte, un modelo es simplemente una representación o imitación de dicho proceso.

2.5.8.1. PRIMER PASO

Consiste en detectar probable modelo ARIMA que sigue serie temporal, lo cual implica:

- Resolver qué transformaciones son necesarias para transformar serie visualizada en serie estacionaria.
- Indicar modelo ARMA para serie estacionaria, definiendo órdenes p y q de su estructura autorregresiva asimismo media móvil.

2.5.8.2. SEGUNDO PASO

Después de elegido de forma provisional el modelo para serie estacionaria, se proviene de fase de estimación. En esta fase, parámetros AR asimismo MA de modelo se estiman por medio de método de verosimilitud máxima, consiguiendo errores estándar además residuos de modelo.

2.5.8.3. TERCER PASO

En esta etapa de diagnóstico, verifica que residuos no presenten estructura de dependencia y acaten proceso de ruido blanco. Si residuos detallan alguna estructura, se llega a alterar el modelo para agregarla y se repiten fases previas hasta conseguir modelo óptimo.

2.5.8.4. CUARTO PASO

Finalmente, se realiza predicción. Posteriormente de conseguido modelo apropiado, se utilizan técnicas de análisis de series temporales para detallar asimismo prever comportamiento de serie, modelizando proceso estocástico del cual proviene. El conglomerado de modelos ARIMA es extensamente empleada asimismo ofrece resultados buenos para predicciones a corto plazo en series temporales que manifiestan comportamientos estacionales.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE INVESTIGACIÓN

3.1. MARCO METODOLÓGICO

Generación de energía hidroeléctrica constituye fuente renovable de relevancia en panorama energético presente. Puntualmente, centrales hidroeléctricas de pasada se particularizan por poseer efecto ambiental inferior en cotejo con centrales de embalse. Este análisis propone metodología para análisis energético de esta clase de centrales, con propósito de valorar desempeño asimismo aporte a sostenibilidad energética.

Metodología planteada se fundamenta en análisis previos además enfoques empleados en campo de energía asimismo producción. Primero, se efectúa análisis energético para indicar operatividad de central hidroeléctrica de pasada, teniendo en cuenta variables como caudal del río, caudal turbinado, potencia eléctrica producida igualmente energía producida por la central.

A continuación, se efectúa análisis ecológico para valorar efecto ambiental de central, enfocándose en el caudal ecológico. Este análisis incluye aspectos como modificación de cauce del río, afectación de ecosistemas terrestres además acuáticos, y probables efectos sobre flora y fauna.

Finalmente, se proyectan los datos del análisis energético en un horizonte de mediano plazo, buscando proporción entre obtención de energía renovable y merma de efectos en el entorno. Esto se consigue por medio de detección de acciones de

mitigación asimismo compensación, como ejecución de acciones de gestión del ambiente.

Metodología planteada proporciona integral marco para análisis energético asimismo ecológico de central hidroeléctrica de pasada. Al tomar en consideración elementos económicos, ambientales además técnicos, obtiene valoración total de viabilidad igualmente sostenibilidad de esta clase de proyectos. Es primordial ejecutar metodología en etapa de planeación además diseño de centrales hidroeléctricas de pasada, con propósito de reducir efecto ambiental asimismo maximizar aporte a obtención de energía renovable.

MÉTODOLOGÍA A EMPLEAR:

La secuencia por desplegar es correspondiente:

- 1) Recolección de datos para el análisis respectivo, tales como: caudal del río, caudal turbinado, potencia efectiva y energía generada de una central hidroeléctrica.
- 2) Procesamiento de los datos obtenidos a fin de determinar valores máximos, mínimos y promedios, así como de sus respectivos gráficos utilizando hojas de cálculo y softwares de ingeniería.
- 3) Determinación de la ecuación de la potencia efectiva, energía generada y factor de planta de la central hidroeléctrica en función del caudal turbinado basándose en los datos recolectados.
- 4) Estimación del caudal ecológico, mediante el enfoque hidrológico, y comparación de dicho valor con lo indicado en la normativa vigente de la localidad.

- 5) Proyección del caudal del río, caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta, utilizando un software de estadística.
- 6) Análisis del volumen de agua de las lagunas cercanas a la central y que alimentan al río mediante un software de ingeniería.
- 7) Comparación y estimación de la cantidad de energía que se estaría produciendo con el volumen de agua adicional que se obtendría del reservorio adicional.

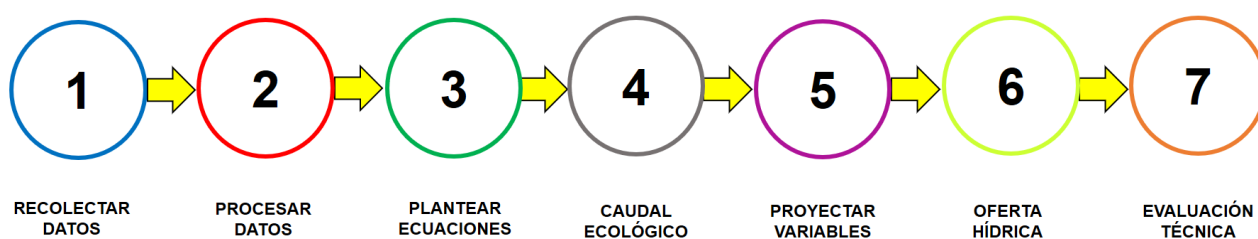


Figura 3.1: Diagrama de flujo de metodología planteada

3.2. MODELO MATEMÁTICO

Para alcanzar análisis integral además puntual de central hidroeléctrica de pasada típica en cuenca peruana, el desarrollo de modelo matemático se erige como recurso primordial. Dada complicación de sistemas hidroeléctricos asimismo requerimiento de abordar elementos energéticos como ecológicos, diversos autores han creado modelos que ayuden valoración cuantitativa de proyectos.

Entre enfoques matemáticos más destacados en campo se encuentra modelo presentado por López y Mendoza (2017) en análisis "Modelo Integrado para Optimización Energética y Ambiental de Centrales Hidroeléctricas de Pasada". El modelo integra optimización de producción de energía con valoración de efectos del entorno. Fundamenta en simulación del funcionamiento de central hidroeléctrica bajo disímiles circunstancias hidrológicas igualmente requerimiento eléctrico. Asimismo,

incluye función de coste ambiental que llega a considerar efectos sobre flujo de agua además ecosistemas acuáticos adyacentes. Propuesta de los autores resalta por enfoque holístico asimismo habilidad para facilitar elección de decisiones pertinentes.

En campo del análisis energético, modelo matemático presentado por Rivera et al. (2019) en investigación "Modelo de Flujo de Potencia para Centrales Hidroeléctricas de Pasada" resalta por énfasis en simulación de flujo de potencia en central e interconexión con red eléctrica. El modelo integra variabilidad de caudal de agua y producción de energía a lo extenso del tiempo, asimismo de abordar transferencia de energía por medio de líneas eléctricas además efecto de central hidroeléctrica en estabilidad de sistema. Metodología propuesta brinda información crucial de aporte de central a red eléctrica y efecto en distribución de energía.

Por otro lado, en el ámbito del análisis ecológico, modelo matemático elaborado por Jiménez y Torres (2020) en su análisis "Modelo de Cambio Ecológico para Evaluación de Impactos en Ríos por Centrales Hidroeléctricas" adquiere gran importancia. El modelo enfocado en simular cómo modificaciones en flujo de agua, derivados de actividad de central, influyen en ecosistemas fluviales. Toma en consideración aspectos como temperatura de agua, sedimentación además variación de hábitats. Metodología de Jiménez y Torres ofrece visión profunda de probables ambientales efectos y ayuda a valoración puntual de peligros ecológicos vinculados.

En síntesis, creación de modelo matemático para estudio ecológico y energético de central hidroeléctrica de pasada en una cuenca peruana es primordial para comprensión en profundidad de elementos ambientales, energéticos además técnicos implicados. Modelos desarrollados por López y Mendoza (2017), Rivera et al. (2019) asimismo Jiménez y Torres (2020) aportan enfoques relevantes por

dimensión. Integración de modelos ayudará a evaluación total y apropiadamente sustentada, permitiendo toma de decisiones informadas en ejecución además administración de centrales hidroeléctricas de pasada en cuenca peruana.

Según Lei Yu et al. (2021), la máxima cantidad de energía generada en centrales hidroeléctricas en cascada se calcula de la siguiente manera:

$$E_1 = \max \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T n_i H_{i,t} Q_{i,t} \Delta t \quad (12)$$

Donde E_1 es la generación máxima anual de energía hidroeléctrica en cascada; n es el número de embalses; T son los números de meses en un año; n_i es el coeficiente de potencia integral; $H_{i,t}$ es la altura promedio en el tiempo; $Q_{i,t}$ es el liberación de la turbina mientras se produce energía (m^3/s); Δt es el paso de tiempo.

Además, la tasa máxima de aseguramiento de generación de energía en cascada para centrales hidroeléctricas se determina así:

$$E_2 = \max \frac{1}{n \times T} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T p_{i,t} \times 100\% \quad (13)$$

Considerando, lo siguiente:

$$p_{i,t} = \begin{cases} 0, & N_{i,t} < N_{i,min} \\ 1, & N_{i,t} \geq N_{i,min} \end{cases} \quad (14)$$

Donde E_2 es la tasa de aseguramiento de la generación de energía en cascada con respecto al número total de períodos; $N_{i,min}$ es la potencia garantizada de la central hidroeléctrica (MW)

Así mismo, la tasa máxima de aseguramiento del caudal ecológico se determina de la siguiente manera:

$$E_3 = \max \frac{1}{n \times T} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T m_{i,t} \times 100\% \quad (15)$$

Donde:

$$m_{i,t} = \begin{cases} 0, & EF_{i,t} < EFT_{i,t} \\ 1, & EF_{i,t} \geq EFT_{i,t} \end{cases} \quad (16)$$

Donde E_3 es la tasa de aseguramiento del caudal ecológico en el tramo del río del número total de períodos; $EF_{i,t}$ y $EFT_{i,t}$ son el caudal ecológico y flujo ecológico objetivo de río aguas abajo de la planta i en momento t , respectivamente (m^3/s), y el $EFT_{i,t}$ se determina mediante el método propuesto en este estudio.

Además, la restricción del equilibrio hídrico queda determinada por la siguiente ecuación:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t})\Delta t - E_{i,t} - L_{i,t} \quad (17)$$

Donde $V_{i,t+1}$ y $V_{i,t}$ se refieren al almacenamiento promedio del yacimiento i en el $(t+1)$ ésimo y t ésimo intervalo de tiempo, respectivamente (m^3); $I_{i,t}$ y $Q_{i,t}$ son el promedio entrada y salida del embalse i en el momento t , respectivamente (m^3/s); $E_{i,t}$ es la evaporación del depósito i en el momento t , (m^3); $L_{i,t}$ es la fuga de agua de depósito i en el momento t (m^3).

Según Marcos Aurelio de Araujo et al. (2022), la potencia en la turbina de una central hidroeléctrica se determina de la siguiente manera:

$$P_t = \gamma_a x Q_t x H_u x n \quad [W] \quad (18)$$

Así mismo, el índice de disponibilidad de las unidades generadoras se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$f_d = (1 - T_{EIF})x(1 - T_{EIP}) \quad [\%] \quad (19)$$

Además, el factor de capacidad (f_c) mide en porcentaje la relación entre la potencia promedio producida en un año y la potencia instalada, f_c se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{P_t}{P_i \times f_d} \quad [\%] \quad (20)$$

Donde P_t es la potencia turbinable [W]; P_i es la potencia instalada [W] y f_d es el factor de disponibilidad [%].

Por lo tanto, la energía generada anual (E_a) corresponde a la energía producida por la unidad generadora en un año, se determina de la siguiente manera:

$$E_a = \frac{P_t \times f_c \times \Delta t}{1000000} \left[\frac{MW}{year} \right] \quad (21)$$

Con respecto al caudal del tramo cortocircuitado, está en función del caudal del río y el caudal turbinado, por lo que hay que tener en cuenta la siguiente restricción para un escenario mensual, donde n representa un dato muestral:

$$Q_{tramo\ c.c.}^n = Q_{rio}^n - Q_{turbinado}^n \quad (22)$$

Además, con respecto al caudal ecológico y el caudal del tramo cortocircuitado, hay que tener en cuenta la restricción siguiente:

$$0 < Q_{ecológico}^n < Q_{tramo\ c.c.}^n \quad (23)$$

Así mismo, con respecto al caudal turbinado y el caudal nominal de la central, hay que tener en cuenta la restricción siguiente:

$$0 < Q_{turbinado}^n < Q_{nominal}^n \quad (24)$$

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DE CASO

4.1. DATOS DE ENTRADA

Central hidroeléctrica elegida es El Platanal, con una instalada potencia de 220 MW. Esta central, que comenzó a operar en el año 2010, está situada en cuenca de río Cañete, entre provincias de Yauyos y Cañete. En 2019, generación anual de energía alcanzó los 1173 GWh.



Figura 4.1: Río Cañete asimismo desarenador de central hidroeléctrica El Platanal

Central entrega la energía eléctrica generada a Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) a través de subestación El Platanal de 220 kV. Cabe destacar que, durante proceso de producción de energía, central no genera efluentes, ya que agua turbinada retorna al río sin sufrir alteraciones en propiedades químicas o físicas.



Figura 4.2: Casa de maquinarias de central hidroeléctrica El Platanal

Tabla 4.1: Datos técnicos de C.H. de El Platanal

Potencia Colocada	220 MW
Altura neta	607 m.
Caudal nominal	40.6 m ³ /s
Grupos generación	2
Túnel aducción	12.45 km
Diámetro tubería	5 m.
Turbinas	2 turbinas Pelton de eje vertical, 110 MW c/u
Generador	Síncronos de polos salientes

Tabla 4.2: Particularidades de las turbinas

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
Fabricante	Voith Siemens Hydro	Voith Siemens Hydro
Tipo	Pelton eje vertical	Pelton eje vertical
Año	2009	2009
Serie	195688	195689
Altura Nominal	607 m	607 m
Potencia nominal	110 MW	110 MW
Caudal nominal	20.3 m ³ /s	20.3 m ³ /s
Velocidad nominal	450 rpm	450 rpm
Velocidad de embalamiento	793 rpm	793 rpm
Cota eje	898,50 msnm	898,50 msnm
N° inyectores por grupo	6	6
Diámetro nominal de chorro	216 mm	216 mm

Tabla 4.3: Particularidades de los generadores eléctricos

Marca	: Voith Siemens
Tipo	: Síncrono de polos salientes
Cantidad	: 2
Potencia Nominal	: 120 MVA
Voltaje	: 13.8 kV
Rango de Operación de voltaje	: +/- 5%
Número de Fases	: 3
Número de polos	: 16
Corriente Nominal	: 5,020A
Factor de Potencia Nominal	: 0.9
Frecuencia Nominal	: 60 Hz
Velocidad Nominal	: 450 rpm
Velocidad de embalamiento	: 793 rpm
Clase aislamiento	: Rotor: F, Estator: F
Excitación	: Estática

A fin de conocer más la problemática de esta central, se realizó una visita de campo en el presente año a dicha central donde se obtuvo información de interés para la presente investigación; los puntos más resaltantes de dicha visita se mencionan a continuación:

Se comprobó que la central hidroeléctrica está conformada por embalse y presa Capillucas, un túnel de aducción, casa de máquinas, subestación y embalse Restitución. La presa Capillucas es una construcción al costado del río Cañete, tipo barrera, que permite almacenar agua, la presa propicia la formación de un embalse de agua, cuya capacidad de contener agua es de hasta 1.8 millones de m³.

Esta presa es un elemento clave para la producción hidroeléctrica ya que hace posible contener y descargar agua, es decir regula, según la demanda de producción energética. La acumulación de agua no solo contribuye a la generación de energía eléctrica, sin que permite amortiguar los efectos de las crecidas de escorrentía debido a las lluvias intensas en la cuenca, así también contribuye con el caudal ecológico en época seca que propicia desarrollo de actividades económicas del área.

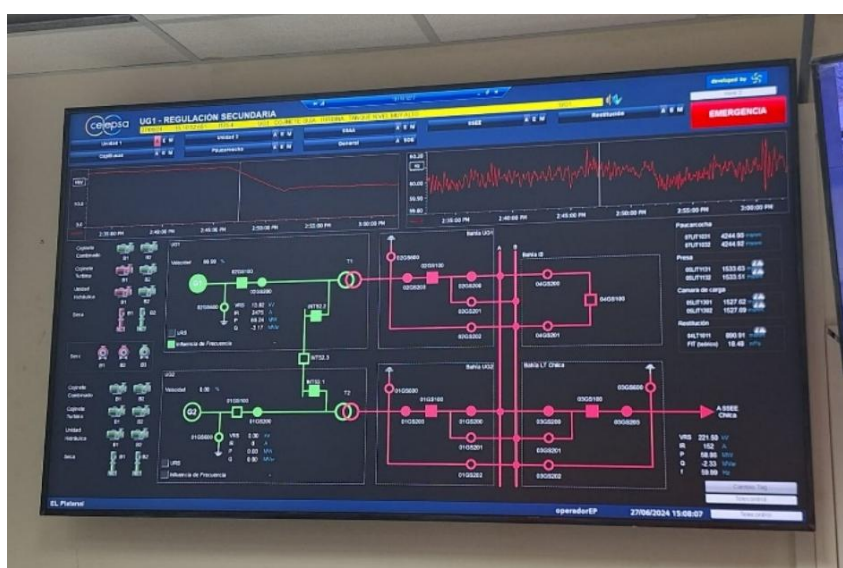


Figura 4.3: Panel de control de la central hidroeléctrica de El platanal

Un punto que resaltar es que, como parte de la contención del agua en el embalse, también se genera acumulación de sedimentos de diversos tipos por la presencia de esta estructura, restando capacidad de almacenamiento al embalse y por lo tanto a la capacidad productiva.

La presa recibe mantenimiento cada cierto tiempo, dejando pasar el sedimento acumulado en el fondo del embalse que es traído por el río de forma natural. Esta actividad está contemplada dentro del estudio de impacto ambiental admitido por Ministerio de Energía y Minas y reconocida por el Ministerio del Ambiente.

El sedimento de un conjunto de partículas sólidas que se quedan acumuladas en un lugar que contiene líquidos que trajo el río durante varios meses, contiene: limos, arena, lodo, material orgánico y otros elementos como zinc, aluminio, hierro, manganeso, plomo, entre otros. Los sedimentos tienen dos fuentes, una natural: lluvias, deslizamientos de tierra o de las mismas riveras del río; y otra humana: las actividades realizadas en cuenca son agricultura, ganadería, entre otras.



Figura 4.4: Grupo turbina-generator de la central hidroeléctrica de El Platanal

El mantenimiento se da en tres etapas, primero: vaciado del agua del embalse, tiempo estimado de 4 a 5 horas; segundo: el mantenimiento propiamente, aproximadamente 6 horas, y tercero: proceso de llenado de embalse, tiempo estimado de 4 a 5 horas.

Así mismo, se verificó que la central hidroeléctrica se comporta como central de pasada en épocas de estiaje, época en que debido a la falta de agua hay problemas sociales con las comunidades aledañas, quienes atribuyen la responsabilidad sobre la falta de agua en el río a la empresa encargada de administrar la central, afectando la economía de población, quienes se dedican a ganadería, agricultura y turismo.



Figura 4.5: Turbina Pelton de la central hidroeléctrica de El Platanal

Por lo que se pudo comprobar sobre la problemática que tiene la empresa con la comunidad por el uso del agua. Siendo el caudal que deja la central en el lecho del río en épocas de estiaje, a lo que se denomina caudal ecológico, en $2 \text{ m}^3/\text{s}$; resultado dicho valor por encima a lo indicado por ANA, cuyo valor establecido de caudal ecológico está en $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Considerando que caudal del río merma en tiempos de estiaje y considerando que debe haber caudal mínimo en el tramo cortocircuitado del río, el resultado es que la central dispone de poca agua para generar energía en varios meses de año afectando su producción y rendimiento.



Figura 4.6: Sala de control de la central hidroeléctrica de El Platanal

Finalmente, la visita técnica permitió conocer más de cerca la problemática que tiene la central que se ve afectada por poca disponibilidad de agua, los reclamos de las comunidades vecinas, las lluvias irregulares debido al fenómeno del niño y las constantes exigencias por parte del COES.

Por lo tanto, si amerita un análisis energético de la central hidroeléctrica de El Platanal a fin de mejorar el aprovechamiento y mejor la producción de energía eléctrica; considerando que dicha problemática se puede revertir si se analiza el almacenamiento de agua que hay en las lagunas ubicadas en parte alta de zona correspondiente a provincia de Yauyos.



Figura 4.7: Patio de llaves de la central hidroeléctrica de El Platanal

Correspondiente información extraída de página web de Comité de Operación Económica de Sistema Interconectado Nacional (COES), siendo primer de enero de 2016 hasta diciembre del 2023, siendo un total de 96 datos, estos son:

4.2. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para análisis de información se sigue secuencia de la metodología planteada en la presente investigación, la cual consta de siete fases, estas son:

FASE 1: RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

En anexo 1 se hallan los datos que se llegaron a recolectar de la web del COES y que registra un total de 96 datos mensuales, desde enero de 2016 hasta diciembre de 2023.

FASE 2: PROCESAMIENTO DE DATOS

De los datos obtenidos identificamos cuatro variables, los cuales son: caudal del río, caudal turbinado, potencia efectiva y energía mensual generada. Donde se pudo obtener valores máximos, mínimos asimismo promedios de cada variable, los cuales mostramos en la tabla N°4.4

Tabla 4.4: Valores máximo, mínimo y promedio de la data

VALOR	CAUDAL RIO CAÑETE (m3/s)	CAUDAL TURBINADO (m3/s)	POTENCIA (MW)	ENERGIA (GWh)
Promedio	43.23	23.66	182.39	92.80
Mínimo	13.00	7.76	56.80	43.00
Máximo	206.65	40.62	223.73	156.45

Así mismo, se muestran gráficos, los cuales son: caudal del río versus tiempo, caudal turbinado versus tiempo, potencia efectiva versus tiempo y energía mensual generada versus tiempo, usando para ello tres formas diferentes, mediante: una hoja de cálculo, Matlab y R-Studio, los cuales se muestran a continuación.

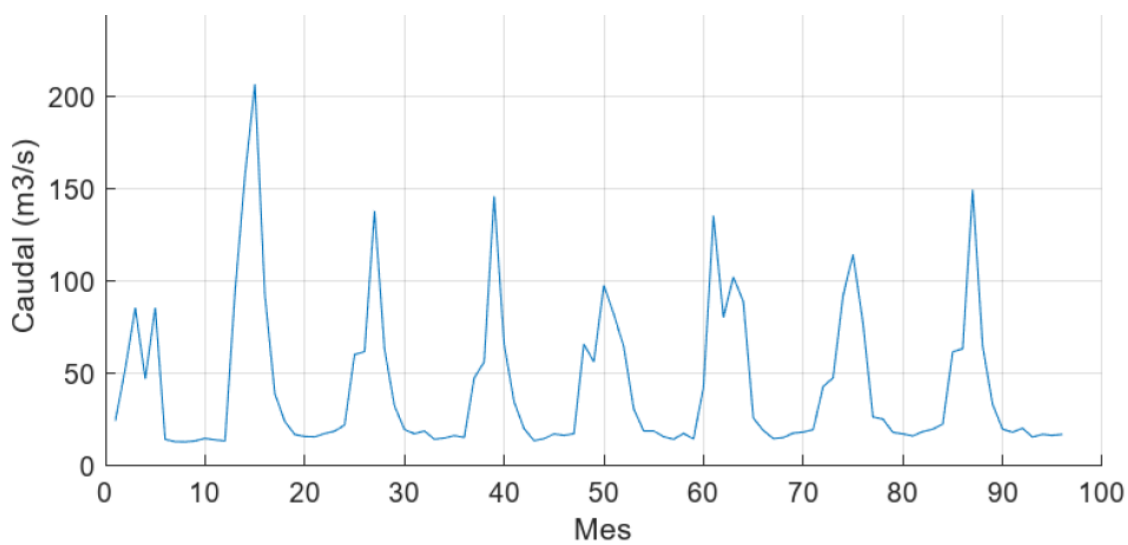


Figura 4.8: Caudal de río vs. tiempo, usando Matlab

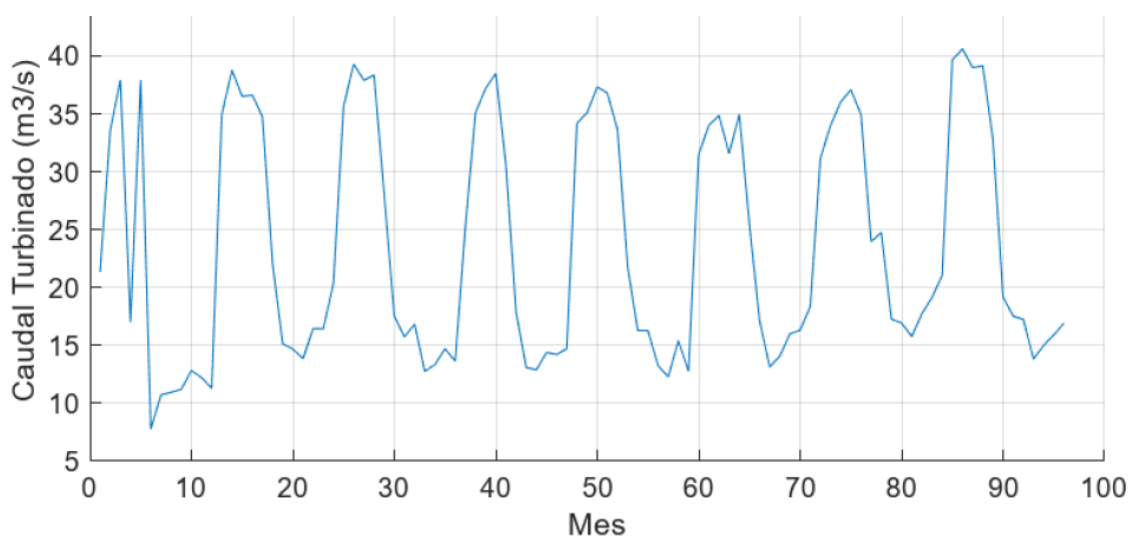


Figura 4.9: Caudal turbinado vs. tiempo, usando Matlab

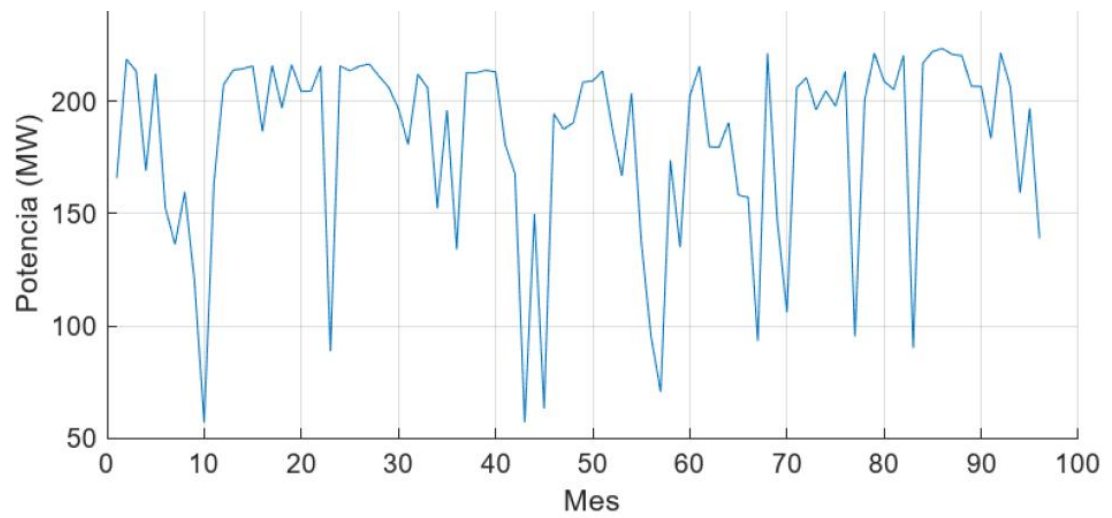


Figura 4.10: Potencia efectiva vs. tiempo, usando Matlab

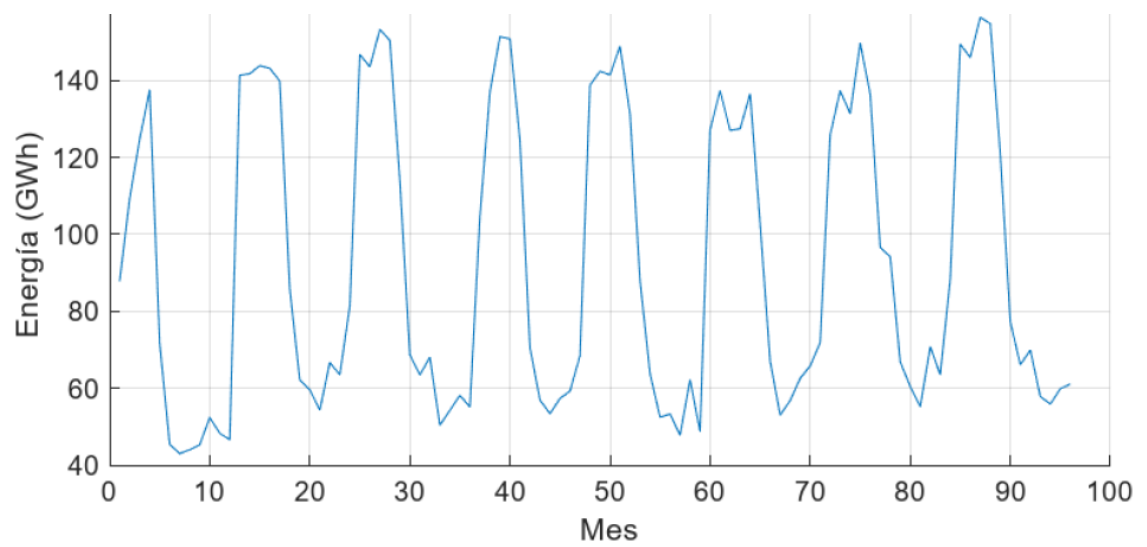


Figura 4.11: Energía producida vs. tiempo, usando Matlab

FASE 3: DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES

3.1 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA POTENCIA

3.1.1 USANDO MATLAB:

Para determinar la ecuación de la potencia efectiva versus caudal turbinado se ha utilizado Matlab, donde se ha utilizado la data obtenida, y se ha buscado la relación entre caudal turbinado y potencia efectiva, siendo la función logarítmica la que más se acerca, siendo la ecuación la siguiente:

$$P = 51.396 \cdot \ln(Q) + 24.634 \quad (25)$$

Donde la potencia está en MW y el caudal turbinado en m³/s. Así mismo, se determinó el coeficiente de determinación R^2 , del cual se obtuvo un valor moderado. A continuación, se muestra el gráfico:

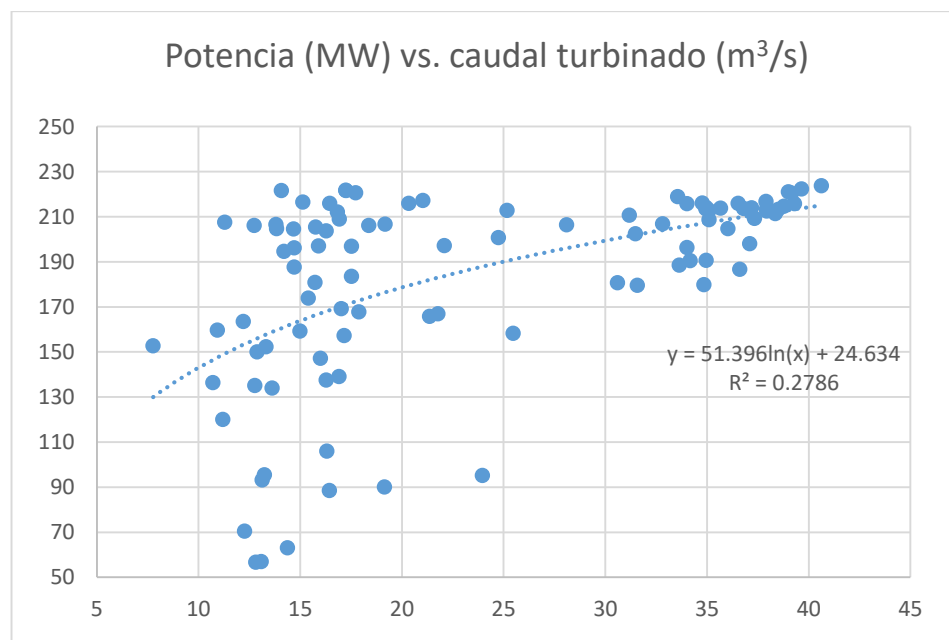


Figura 4.12: Potencia efectiva vs. caudal turbinado, usando Matlab

3.2 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA

3.2.1 USANDO MATLAB:

Para determinar la ecuación de la energía generada versus caudal turbinado se ha utilizado Matlab, donde se ha utilizado la data obtenida, y se ha buscado la relación entre caudal turbinado y la energía generada, siendo la función lineal la que más se acerca, siendo la ecuación la siguiente:

$$E = 3.6301 \cdot Q + 6.9083 \quad (26)$$

Donde la energía está en GWh y el caudal turbinado en m³/s. Así mismo, se determinó el coeficiente de determinación R^2 , del cual se obtuvo un valor moderado.

A continuación, se muestra el grafico:

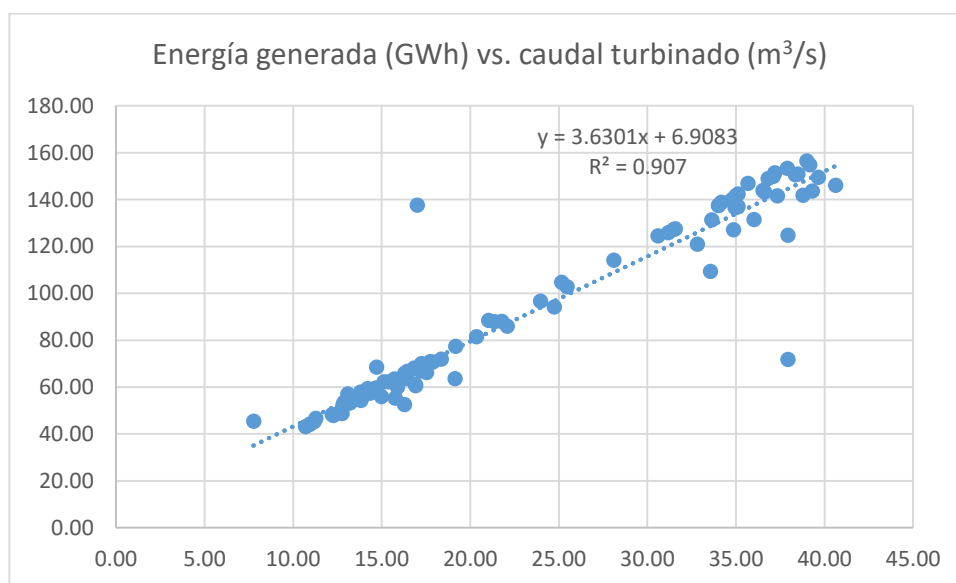


Figura 4.13: Energía generada vs. caudal turbinado, usando Matlab

3.3 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL FACTOR DE PLANTA

3.3.1 USANDO MATLAB:

Para determinar la ecuación del factor de planta versus caudal turbinado se ha utilizado Matlab, donde se ha utilizado la data obtenida, y se ha buscado la relación entre el caudal turbinado y el factor de planta, siendo la función lineal la que más se acerca, siendo la ecuación la siguiente:

$$Fp = 0.0229.Q + 0.0436 \quad (27)$$

Donde el factor de planta no tiene unidades y el caudal turbinado está en m³/s. Así mismo, se determinó el coeficiente de determinación R², del cual se obtuvo un valor de 0.907; a continuación, se muestra el grafico:

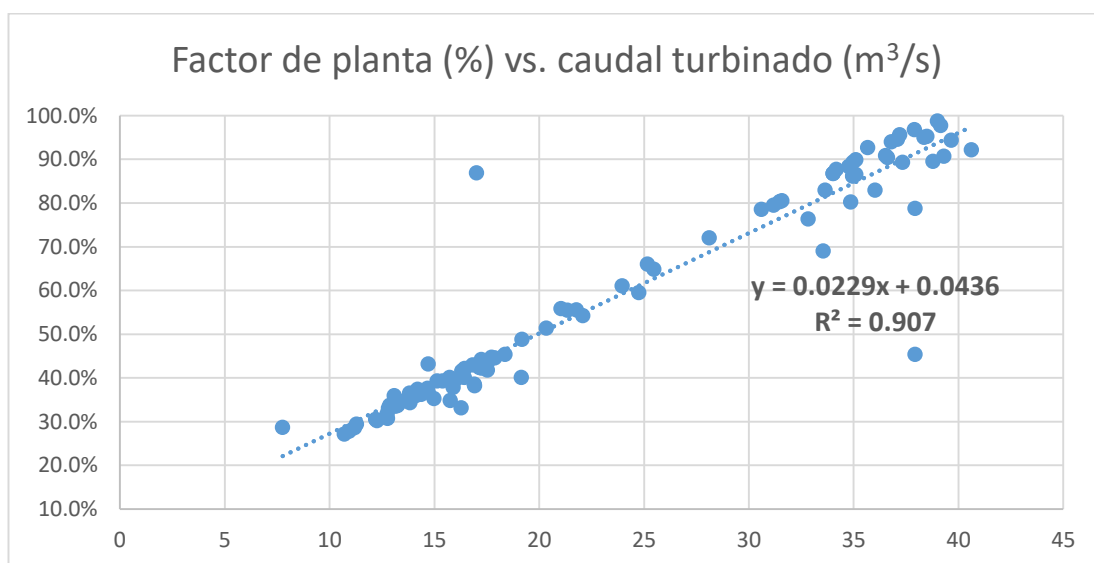


Figura 4.14: Factor de planta vs. caudal turbinado, usando Matlab

FASE 4: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

Conforme con data previa, caudal del tramo cortocircuitado se consigue de contraste entre caudal de río y turbinado.

Tabla 4.5: Caudales de río, turbinado además cortocircuitado

MES	CAUDAL RIO CAÑETE (m3/s)	CAUDAL TURBINADO (m3/s)	CAUDAL TRAMO C.C. (m3/s)
1	24.39	21.35	3.04
2	52.74	33.55	19.19
3	85.56	37.93	47.63
4	47.13	17.01	30.12
5	85.56	37.93	47.63
6	14.28	7.76	6.52
7	13.10	10.70	2.40
8	13.00	10.93	2.07
9	13.47	11.19	2.28
10	14.88	12.81	2.07
11	14.05	12.20	1.85
12	13.52	11.28	2.24
13	93.78	34.96	58.82
14	157.04	38.78	118.26
15	206.65	36.52	170.13
16	92.62	36.61	56.01
17	39.08	34.76	4.32
18	24.03	22.08	1.95
19	16.98	15.13	1.85
20	15.90	14.67	1.23
21	15.74	13.83	1.91
22	17.49	16.44	1.05
23	18.77	16.43	2.34
24	22.14	20.34	1.80
25	60.26	35.66	24.60
26	61.84	39.30	22.54
27	138.04	37.90	100.14
28	63.33	38.35	24.98
29	32.59	28.10	4.49
30	19.67	17.52	2.15
31	17.40	15.72	1.68
32	18.86	16.83	2.03

33	14.41	12.74	1.67
34	15.06	13.32	1.74
35	16.40	14.70	1.70
36	15.35	13.62	1.73
37	47.59	25.16	22.43
38	56.32	35.10	21.22
39	145.96	37.19	108.77
40	65.88	38.49	27.39
41	34.71	30.59	4.12
42	20.17	17.88	2.29
43	13.61	13.08	0.53
44	14.72	12.87	1.85
45	17.30	14.37	2.93
46	16.51	14.20	2.31
47	17.40	14.70	2.70
48	65.88	34.17	31.71
49	56.32	35.10	21.22
50	97.71	37.33	60.38
51	82.22	36.80	45.42
52	64.54	33.63	30.91
53	30.89	21.77	9.12
54	18.90	16.27	2.63
55	18.90	16.27	2.63
56	15.80	13.23	2.57
57	14.38	12.26	2.12
58	17.57	15.39	2.18
59	14.60	12.76	1.84
60	42.59	31.47	11.12
61	135.39	34.01	101.38
62	80.42	34.85	45.57
63	102.23	31.57	70.66
64	88.92	34.96	53.96
65	25.87	25.46	0.41
66	19.21	17.15	2.06
67	14.76	13.12	1.64
68	15.29	14.07	1.22
69	17.70	15.99	1.71
70	18.28	16.30	1.98
71	19.60	18.36	1.24
72	42.88	31.17	11.71
73	47.77	34.01	13.76

74	92.13	36.02	56.11
75	114.35	37.09	77.26
76	77.28	34.94	42.34
77	26.46	23.96	2.50
78	25.31	24.74	0.57
79	18.11	17.25	0.86
80	17.32	16.92	0.40
81	16.19	15.76	0.43
82	18.53	17.72	0.81
83	19.82	19.14	0.68
84	22.63	21.03	1.60
85	61.74	39.65	22.09
86	63.41	40.62	22.79
87	149.46	39.00	110.46
88	64.92	39.15	25.77
89	33.33	32.82	0.51
90	19.93	19.17	0.76
91	18.20	17.52	0.68
92	20.38	17.23	3.15
93	15.58	13.81	1.77
94	17.06	14.98	2.08
95	16.50	15.89	0.61
96	17.08	16.90	0.18

Considerando los resultados de la tabla 4.5, realizamos el cálculo del caudal ecológico, considerando que el caudal cortocircuitado debe ser mayor que el caudal de compensación o ecológico; para ello se ha tomado como referencia el cálculo desarrollado en el artículo de investigación realizado por el suscrito hace unos años cuyo título es “Determinación de caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico” (ver anexo 2) donde se establece una metodología para realizar dicho cálculo. Siendo esta una alternativa para determinación de caudal ecológico en presente investigación.

Así mismo, aplicando el modelo matemático para determinación de caudal ecológico y considerando metodología para determinación de caudal ecológico según ANA (ver anexo 4), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.6: Estimación del caudal ecológico

MES	CAUDAL ECOLOGICO (m3/s)				
	MINIMO: 10%	ACEPTABLE: 10 hasta 30%	BUENO: 20 hasta 40%	EXCELENTE: 30 hasta 50%	EXCEPCIONAL: 40 hasta 60%
1	3.26	9.79	13.06	16.32	19.58
2	3.26	9.79	13.06	16.32	19.58
3	3.26	9.79	13.06	16.32	19.58
4	3.26	9.79	13.06	16.32	19.58
5	3.26	9.79	13.06	16.32	19.58
6	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
7	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
8	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
9	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
10	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
11	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
12	3.26	3.26	6.53	9.79	13.06
13	6.00	18.01	24.01	30.01	36.01
14	6.00	18.01	24.01	30.01	36.01
15	6.00	18.01	24.01	30.01	36.01
16	6.00	18.01	24.01	30.01	36.01
17	6.00	18.01	24.01	30.01	36.01
18	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
19	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
20	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
21	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
22	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
23	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
24	6.00	6.00	12.00	18.01	24.01
25	3.94	11.83	15.77	19.72	23.66
26	3.94	11.83	15.77	19.72	23.66
27	3.94	11.83	15.77	19.72	23.66
28	3.94	11.83	15.77	19.72	23.66
29	3.94	11.83	15.77	19.72	23.66
30	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77

31	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77
32	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77
33	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77
34	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77
35	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77
36	3.94	3.94	7.89	11.83	15.77
37	4.30	12.90	17.20	21.50	25.80
38	4.30	12.90	17.20	21.50	25.80
39	4.30	12.90	17.20	21.50	25.80
40	4.30	12.90	17.20	21.50	25.80
41	4.30	12.90	17.20	21.50	25.80
42	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
43	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
44	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
45	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
46	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
47	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
48	4.30	4.30	8.60	12.90	17.20
49	3.95	11.86	15.81	19.77	23.72
50	3.95	11.86	15.81	19.77	23.72
51	3.95	11.86	15.81	19.77	23.72
52	3.95	11.86	15.81	19.77	23.72
53	3.95	11.86	15.81	19.77	23.72
54	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
55	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
56	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
57	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
58	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
59	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
60	3.95	3.95	7.91	11.86	15.81
61	4.84	14.51	19.35	24.19	29.03
62	4.84	14.51	19.35	24.19	29.03
63	4.84	14.51	19.35	24.19	29.03
64	4.84	14.51	19.35	24.19	29.03
65	4.84	14.51	19.35	24.19	29.03
66	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35
67	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35
68	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35
69	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35
70	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35
71	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35

72	4.84	4.84	9.68	14.51	19.35
73	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
74	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
75	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
76	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
77	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
78	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
79	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
80	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
81	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
82	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
83	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
84	4.13	4.13	8.27	12.40	16.53
85	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
86	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
87	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
88	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
89	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
90	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
91	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
92	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
93	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
94	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
95	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59
96	4.15	4.15	8.29	12.44	16.59

Tabla 4.7. Distribución de Weibull de caudales del río

RANGO (m3/s)	FRECUENCIA	FREC. RELATIVA
0 hasta 25	53	55%
26 hasta 50	13	14%
51 hasta 75	12	13%
76 hasta 100	10	10%
101 hasta 150	6	6%
151 hasta 200	1	1%
200 hasta 250	1	1%

FASE 5: PROYECCIÓN DE LAS VARIABLES TEMPORALES

5.1 CAUDAL DEL RÍO

Los datos empleados de serie temporal de caudal mensual del río Cañete se basaron en registros históricos correspondientes a central hidroeléctrica de El Platanal, desde enero de 2016 hasta diciembre de 2023, se tiene un total de 96 observaciones cuyo comportamiento se muestra en la figura 4.28.

La serie CAUDAL, de acuerdo con los datos obtenidos no presenta una tendencia marcada, lo que muestra que el caudal del río tiene un comportamiento alrededor de una media constante, además los datos de la serie presentan una variabilidad cambiante a lo largo del tiempo por lo que en general se puede considerar que la serie no tiene varianza homogénea, con respecto a la estacionalidad de los datos, la serie si presenta estacionalidad de periodo 12 meses. La serie muestra un marcado patrón estacional, ya que los niveles de caudal alcanzan su punto máximo en el mes de marzo.

A partir de las características observadas, la serie presenta tendencia constante pero la varianza no es homogénea, por lo que se puede decir que serie temporal es estacionaria en media, pero no es estacionaria en varianza, y además la serie presenta estacionalidad.

Cabe detallar que para análisis de la proyección de variables de presente investigación como: caudal del río, caudal turbinado, potencia y energía, se tomó como base el artículo “Análisis Estocástico del Caudal del Río Vilcanota en la central Hidroeléctrica de Machupicchu mediante modelos ARIMA 2023”, en donde el suscrito tuvo participación en la elaboración de dicho artículo.

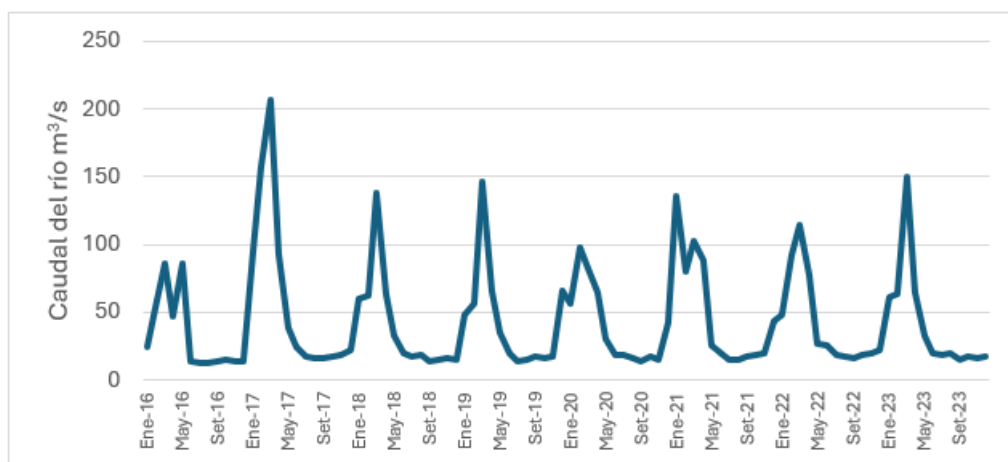


Figura 4.15: Serie temporal del caudal del río del 2016 al 2023

La tabla 4.8 presenta las estadísticas calculadas para la serie caudal mensual del río. Los datos muestran que se obtuvo un nivel de caudal mensual promedio de aproximadamente 43.23 (m^3/s). Del resultado se puede observar que, el nivel de caudal mínimo fue 13 (m^3/s) además máximo de 206.65 (m^3/s), por lo que se evidencia que existe una diferencia sustancial en los valores de caudal máximo y mínimo, lo que indica la importante dependencia de la generación hidroeléctrica de las condiciones climáticas.

Tabla 4.8: Estadísticas de la serie caudal del río

Estadísticos descriptivos					
Caudal del río (m^3/s)	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
Caudal	96	13,00	206,65	43,2252	39,67137
N válido (por lista)	96				

La metodología del modelo ARIMA requiere que serie temporal sea estacionaria en media asimismo varianza, y libre de estacionalidad. Esta metodología desarrolla cuatro etapas que son la identificación, estimación, verificación y el pronóstico del modelo.

Analizando la serie CAUDAL se evidenció que es estacionaria en media, pero no en varianza. No estacionariedad en varianza se puede abordar aplicando una transformación a la serie, en la práctica se recomienda aplicar una transformación logarítmica ($\ln_CAUDAL$). Por otro lado, como la serie presenta estacionalidad, dicha serie tiene que estar libre de estacionalidad, por ello se realizó una diferencia estacional a la serie para eliminar dicha estacionalidad.

Entonces, lo primero, se aplica la transformación logaritmo a la serie ($\ln_CAUDAL$) para obtener estacionariedad de varianza, luego la serie transformada no será diferenciada en la parte regular, pero si diferenciada en la parte estacional ($d=0$ y $D=1$). Siendo modelo $ARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$, de forma $ARIMA(p,0,q) \times (P,1,Q)_s$ para la serie transformada logarítmicamente.

5.1.1. IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

En la identificación de la orden autorregresiva $AR(p)$ y de media móvil $MA(q)$ regular, y la orden autorregresiva $AR(p)_s$ y de media móvil $MA(Q)_s$ estacional se emplearon función de autocorrelación simple ACF igualmente función de autocorrelación parcial ACFP de serie CAUDAL transformada logarítmicamente y diferenciada estacionalmente, vistas en las figuras 4.16 y 4.17

Para analizar parte regular de serie, se observa en la función de autocorrelación que las autocorrelaciones simples no son significativas, esto sugiere que la serie no tendría parte media móvil regular, y en función de autocorrelación parcial, se ve también que las autocorrelaciones parciales no son significativas, esto sugiere que esta serie temporal no tendría parte autorregresiva regular, por lo tanto, se considera para la parte regular de la serie un modelo de la forma $ARMA(0,0)$ con $p=0$ y $q=0$. Para analizar la parte estacional en base a los rezagos estacionales, se puede

observar en la función de autocorrelación que solo la autocorrelación simple del rezago 12 (primer rezago estacional) es bastante significativo, esto sugiere que la serie tiene una parte de media móvil estacional de la forma $MA(1)_s$; y en función de autocorrelación parcial, se ve que autocorrelación parcial estacional (periodo 12) es significativa, se podría tomar ese rezago estacional (periodo 12), esto sugiere que la serie se puede describir mediante un modelo autorregresivo estacional $AR(1)_s$, por lo tanto, en general una alternativa para parte estacional de serie será un modelo de la forma $ARMA(1,1)_s$ con $P=1$ y $Q=1$.

Luego, el orden del modelo a ajustar es, $ARIMA(0,0,0) \times (1,1,1)_s$.

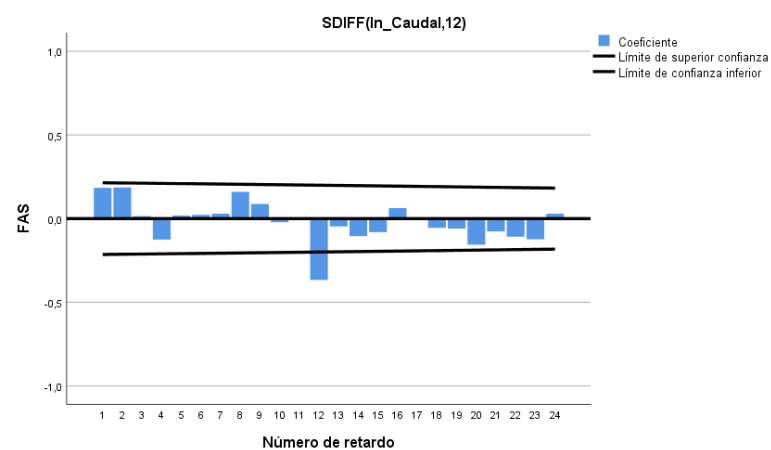


Figura 4.16: Autocorrelaciones simples de serie $\ln_CAUDAL$ diferenciada estacionalmente

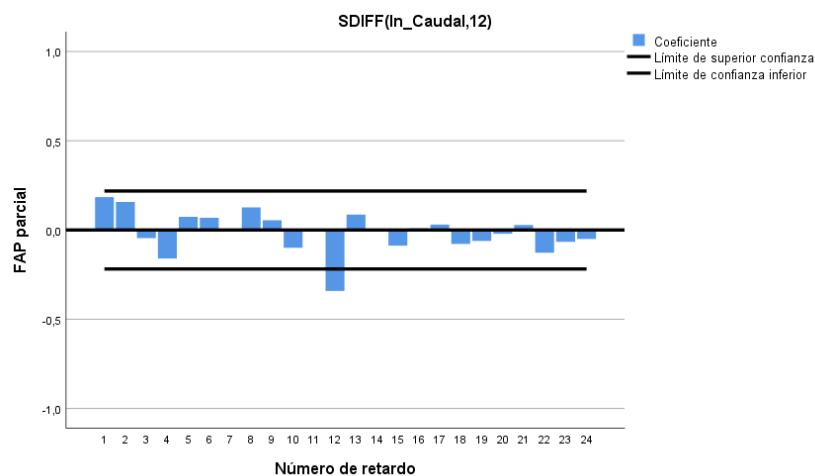


Figura 4.17: Autocorrelaciones parciales de serie ln_CAUDAL diferenciada estacionalmente

En la práctica, se recomienda considerar además modelos alternativos que se espera utilizar, para decidir en qué punto es la simplificación.

Teniendo en cuenta las características de la serie, sus características de estacionalidad y tendencia proponemos evaluar los siguientes modelos ARIMA:

Tabla 4.9: Modelos ARIMA de la serie caudal del río

Modelo	Modelo ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)s	Condición
1	(0,0,0)x(1,1,1)	Propuesto
2	(1,0,1)x(1,1,1)	Alternativo

5.1.2. ESTIMACIÓN

En esta etapa se realiza estimación de parámetros en modelos ARIMA. Se especificaron dos modelos ARIMA(p,0,q)x(P,1,Q)s para la serie ln_CAUDAL mensual de la central hidroeléctrica de El Platanal. Los modelos son sometidos a análisis para ver si sus parámetros son significativos.

Para la selección del modelo se calcularon las estadísticas de ajuste, como coeficiente de determinación (R^2) y criterio de información bayesiano (BIC), visto en

la tabla 4.10; el R^2 es el porcentaje de variabilidad en variable dependiente explicada por modelo estimado en la serie y el BIC es un indicador utilizado para la selección de modelos en la estadística bayesiana. Un modelo ideal debería tener el BIC más bajo y el R^2 más alto.

Tabla 4.10: Indicadores de ajuste de modelos ARIMA

ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)s	R^2	BIC
(0,0,0)x(1,1,1)	0.610	6.666
(1,0,1)x(1,1,1)	0.635	6.730

Tabla 4.10 se resume indicadores de ajuste de modelos ARIMA especificados y se visualiza que modelo ARIMA(0,0,0)x(1,1,1)s, es el que presenta un menor valor del indicador BIC, y siendo el R^2 es algo inferior con respecto al otro modelo. Con base en los resultados presentados, se eligió el ARIMA(0,0,0)x(1,1,1)s para nuestro análisis posterior.

Tabla 4.11, se detalla estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (0,0,0)x(1,1,1)s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que los parámetros del modelo ARIMA fueron no significativos (con Sig.>0.05), pero se tuvo un buen comportamiento de los residuos del modelo y de los pronósticos.

Tabla 4.11: Estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (0,0,0)x(1,1,1)s para la serie ln_CAUDAL

Parámetros del modelo ARIMA				Estimación	SE	t	Sig.
Caudal-Modelo_1	Caudal	Logaritmo natural	Constante	,016	,014	1,140	,258
			AR, estacional Retardo 1	,040	,175	,229	,820
			Diferencia estacional	1			
			MA, estacional Retardo 1	,963	1,061	,907	,367

La ecuación del modelo ARIMA (0,0,0)x(1,1,1)s para la serie $\ln_CAUDAL$ se muestra en la siguiente ecuación:

$$(1 - \Phi L^{12})(1 - L^{12}) \ln_CAUDAL_t = \theta_0 + (1 - \Theta L^{12})a_t \quad (28)$$

$$(1 - 0.04L^{12})(1 - L^{12}) \ln_VOLUMEN_t = 0.016 + (1 - 0.963L^{12})a_t \quad (29)$$

Donde $Z_t = \ln_CAUDAL_t$

$$Z_t = 0.016 + 1.04Z_{t-12} - 0.04Z_{t-24} + a_t - 0.963a_{t-12} \quad (30)$$

5.1.3. VERIFICACIÓN

En esta etapa se busca comprobar si modelo ajustado obtenido es adecuado para los datos. La verificación puede ser hecha analizando los residuos. Residuos son diferencia entre valores predichos del modelo estimado y las observaciones reales. Si el modelo ajustado fuera adecuado, los residuos deberán comportarse como ruido blanco (media cero asimismo varianza constante) y, por tanto, deberán ser aproximadamente no correlacionados.

Una forma de comprobar si los residuos no están correlacionados es observar sus correlogramas (autocorrelaciones simples y autocorrelaciones parciales) de los residuos. Los residuales se comportan como ruido blanco si sus correlogramas no tienen picos significativos.

Figura 4.31 se detalla la gráfica de residuos, se aprecia que valores están alrededor de un valor medio igual a cero y presentan aleatoriedad.

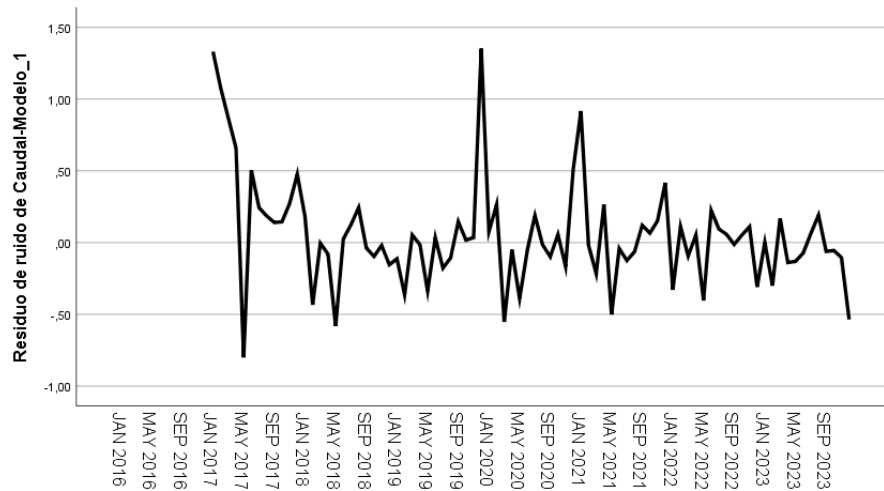


Figura 4.18: Gráfico residuos de modelo ajustado ARIMA (0,0,0)x(1,1,1)s, a serie CAUDAL transformada logarítmicamente

En la figura 4.19 se presenta autocorrelaciones simples así mismo autocorrelaciones parciales de residuos del modelo ajustado, se visualiza que coeficientes estimados son estadísticamente nulos por lo que no sobresalen de límites inferior y superior de bandas, dicha grafica evidencia que los residuos no están correlacionados y por lo que se manifiestan como ruido blanco (varianza constante además media cero).

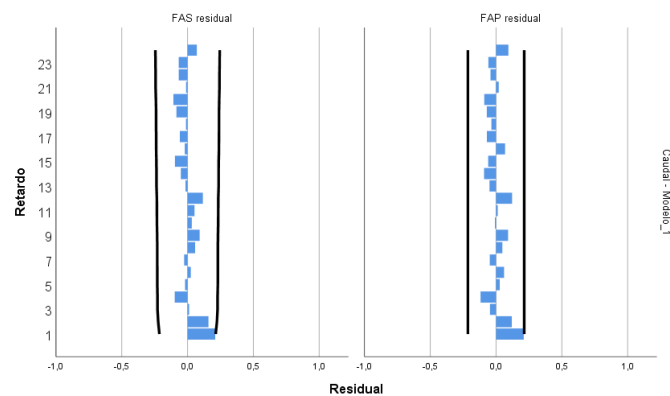


Figura 4.19: Autocorrelación simple (izquierda) así mismo autocorrelación parcial (derecha) de residuos de modelo ARIMA(0,0,0)x(1,1,1)s, serie CAUDAL transformada logaritmo

Después de las comprobaciones, podemos concluir que el modelo ARIMA(0,0,0)x(1,1,1)s tiene un ajuste adecuado a serie temporal del caudal mensual, por lo que, es modelo que usaremos para predecir valores futuros de la serie.

5.1.4. PREDICCIÓN

El cálculo de las predicciones de la serie temporal CAUDAL, utilizando el modelo ARIMA ajustado, se realiza a partir de las expresiones matemáticas obtenidas en el proceso de estimación y ajuste, en nuestro caso, hemos seleccionado el modelo óptimo (0,0,0)x(1,1,1)s y puede ser un buen modelo predictivo, luego la ecuación tiene la siguiente forma.

Sea modelo ajustado ARIMA (0,0,0)x(1,1,1)s, la cual tiene la estructura:

$$Z_t = 0.016 + 1.04Z_{t-12} - 0.04Z_{t-24} + a_t - 0.963a_{t-12} \quad (31)$$

Donde: $Z_t = \ln_CAUDAL_t$

Despejando Z_t , se tendrá el pronóstico respectivo, $\hat{Z}_{t+h}$, siendo $h=1,2,3, \dots$

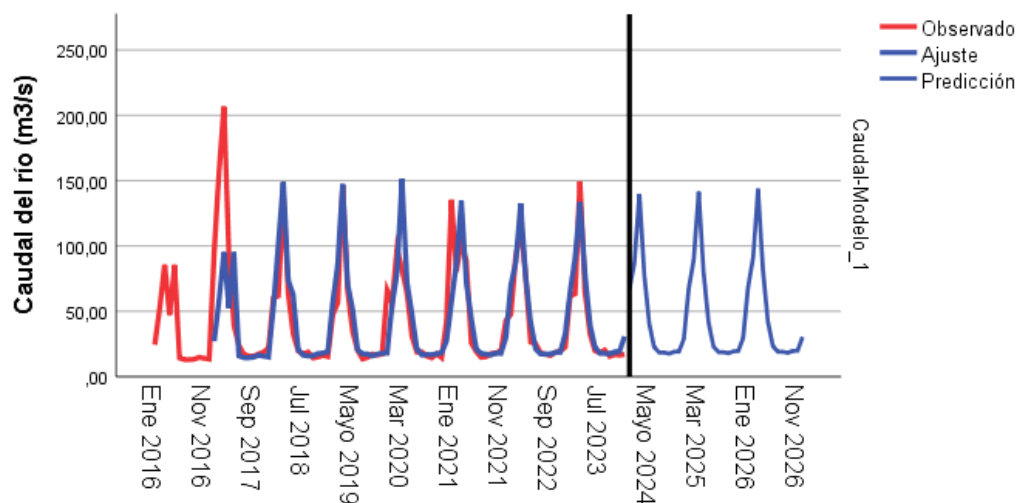


Figura 4.20: Gráfico de serie observada, ajustada además los pronósticos (2024 al 2026)

Tabla 4.12: Pronóstico del caudal del río

PRONOSTICOS 2024 – 2026: Caudal del río (m³/s)			
Modelo	Caudal-Modelo_1		
	Predicción	UCL	LCL
Ene 2024	66.78	121.23	33.07
Feb 2024	86.95	157.85	43.05
Mar 2024	139.84	253.86	69.24
Abr 2024	78.00	141.59	38.62
May 2024	40.41	73.36	20.01
Jun 2024	22.55	40.94	11.17
Jul 2024	18.48	33.55	9.15
Ago 2024	18.60	33.77	9.21
Sep 2024	17.59	31.93	8.71
Oct 2024	19.11	34.70	9.46
Nov 2024	19.24	34.92	9.52
Dic 2024	28.88	52.42	14.30
Ene 2025	67.95	123.75	33.49
Feb 2025	89.32	162.68	44.03
Mar 2025	141.46	257.65	69.73
Abr 2025	79.70	145.15	39.28
May 2025	41.31	75.23	20.36
Jun 2025	22.99	41.86	11.33
Jul 2025	18.76	34.16	9.25
Ago 2025	18.80	34.24	9.27
Sep 2025	17.93	32.65	8.84
Oct 2025	19.48	35.47	9.60
Nov 2025	19.63	35.75	9.68
Dic 2025	29.91	54.48	14.74
Ene 2026	69.07	125.77	34.05
Feb 2026	90.83	165.39	44.78
Mar 2026	143.76	261.78	70.88
Abr 2026	81.02	147.54	39.95
May 2026	42.00	76.47	20.71
Jun 2026	23.37	42.55	11.52
Jul 2026	19.06	34.71	9.40
Ago 2026	19.10	34.79	9.42
Sep 2026	18.22	33.18	8.98
Oct 2026	19.80	36.05	9.76
Nov 2026	19.96	36.34	9.84
Dic 2026	30.43	55.41	15.00

5.2. CAUDAL TURBINADO

La serie temporal del caudal turbinado mensual del río Cañete se consiguió de registros de central hidroeléctrica de El Platanal, desde enero de 2016 hasta diciembre de 2023, se tiene 96 observaciones los cuales se muestran en la Figura 4.34.

La serie CAUDAL TURBINADO, de acuerdo con los datos obtenidos no presenta una tendencia marcada y presenta una varianza homogénea en el tiempo, con respecto a la estacionalidad de los datos, la serie si presenta estacionalidad de periodo 12 meses. La serie muestra un marcado patrón estacional, ya que los niveles de caudal turbinado alcanzan su punto máximo en meses de febrero, marzo asimismo abril.

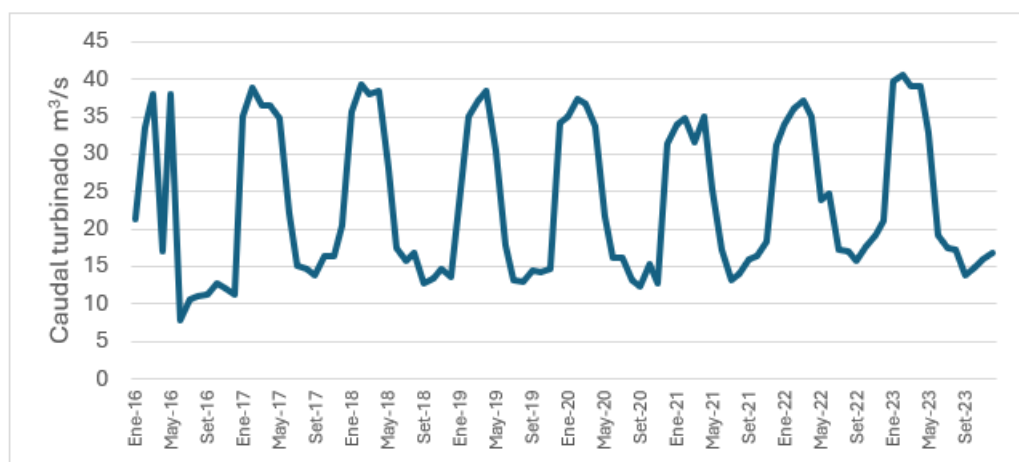


Figura 4.21: Serie temporal del caudal turbinado, del 2016 al 2023

La tabla 4.13 presenta las estadísticas calculadas para la serie caudal turbinado. Los datos muestran que se obtuvo un nivel de caudal turbinado mensual promedio de 23.66 (m^3/s). Del resultado se puede observar que, el nivel de caudal turbinado mínimo fue 7.76 (m^3/s) y máximo de 40.62 (m^3/s).

Tabla 4.13: Estadísticas de la serie caudal turbinado

Estadísticos descriptivos					
Caudal turbinado (m³/s)	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
Caudal turbinado	96	7,76	40,62	23,6600	10,15082
N válido (por lista)	96				

La metodología del modelo ARIMA requiere que serie temporal sea estacionaria en media además en varianza, y libre de estacionalidad.

Analizando la serie CAUDAL TURBINADO se evidenció que es estacionaria en media asimismo varianza, pero presenta estacionalidad. Entonces, la serie no será diferenciada en la parte regular, pero si diferenciada en la parte estacional ($d=0$ y $D=1$), siendo el modelo $ARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ con componente regular y estacional, de la forma $ARIMA(p_0,q) \times (P,1,Q)_s$.

5.2.1. IDENTIFICACIÓN DE MODELO

En identificación de modelo ARIMA se emplean función de autocorrelación simple ACF asimismo función de autocorrelación parcial ACFP de serie CAUDAL TURBINADO diferenciada estacionalmente, vistas en las figuras 4.35 y 4.36

Para analizar la parte regular de la serie, se observa que las autocorrelaciones simples no son significativas, esto sugiere que la serie no tendría parte media móvil regular, y se ve también que las autocorrelaciones parciales no son significativas, esto sugiere que esta serie temporal no tendría parte autorregresiva regular, por lo tanto, se considera para la parte regular de la serie un modelo de la forma $ARMA(0,0)$ con $p=0$ y $q=0$. Para analizar la parte estacional en base a los rezagos estacionales, se puede observar que solo la autocorrelación simple del rezago 12 (primer rezago

estacional) es algo significativo, esto sugiere que la serie tiene una parte de media móvil estacional de la forma $MA(1)s$; y se ve que las autocorrelaciones parciales estacional no son significativas, esto sugiere que la serie no tiene parte autorregresiva estacional, por lo tanto, en general una alternativa para parte estacional de serie será un modelo de la forma $ARMA(0,1)s$ con $P=0$ y $Q=1$.

Luego, el orden del modelo a ajustar es, $ARIMA(0,0,0) \times (0,1,1)s$.

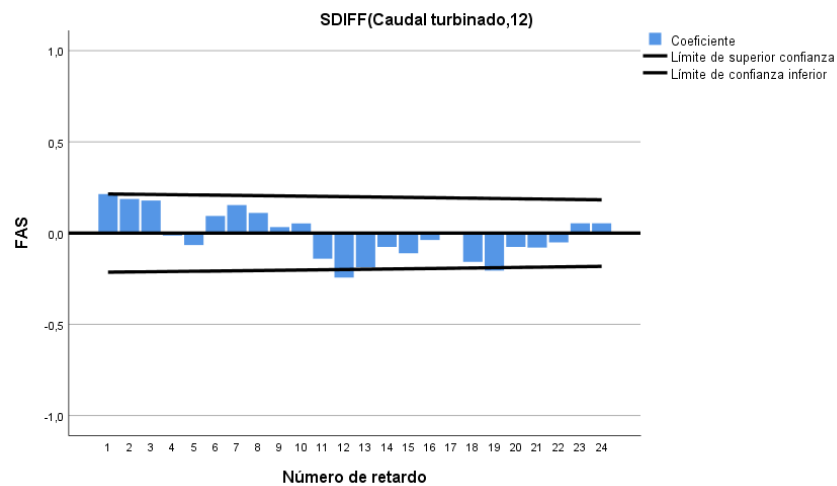


Figura 4.22: Autocorrelaciones simples de serie CAUDAL TURBINADO diferenciada estacionalmente

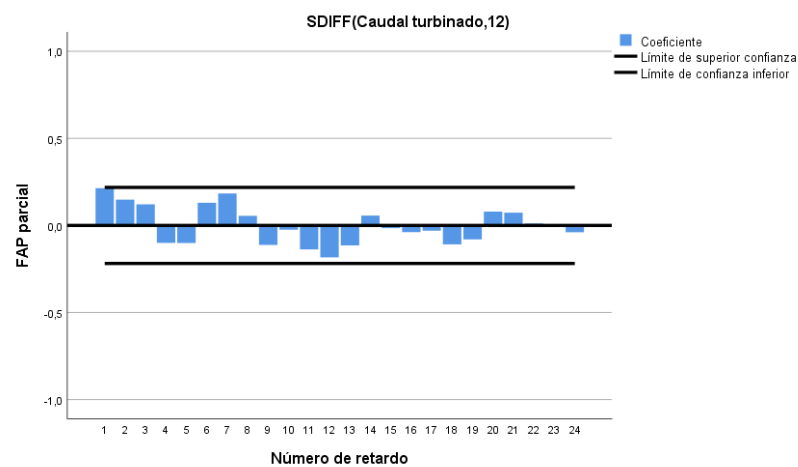


Figura 4.23: Autocorrelaciones parciales de serie CAUDAL TURBINADO diferenciada estacionalmente

Teniendo en cuenta las características de la serie, sus características de estacionalidad y tendencia proponemos evaluar los siguientes modelos ARIMA:

Tabla 4.14: Modelos ARIMA de la serie caudal turbinado

Modelo	Modelo ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q) _s	Condición
1	(0,0,0)x(0,1,1)	Propuesto
2	(1,0,1)x(0,1,1)	Alternativo

5.2.2. ESTIMACIÓN

En esta etapa se realiza estimación de parámetros en modelos ARIMA. Se especificaron dos modelos para la serie CAUDAL TURBINADO mensual. Para la selección del modelo se calcularon las estadísticas de ajuste, como coeficiente de determinación (R^2) y criterio de información bayesiano (BIC), visto en la tabla 4.16. Un modelo ideal debería tener el BIC más bajo y el R^2 más alto.

En la tabla 4.15 se resume los indicadores de ajuste del modelo ARIMA especificados y se visualiza que modelo ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)_s, es el que presenta un menor valor del indicador BIC, y teniendo un R^2 algo inferior con respecto al otro modelo. Con base en los resultados presentados, se eligió el ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)_s para nuestro análisis posterior.

Tabla 4.15: Indicadores de ajuste de los modelos ARIMA

ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q) _s	R^2	BIC
(0,0,0)x(0,1,1)	0.719	3.423
(1,0,1)x(0,1,1)	0.737	3.487

Tabla 4.16 se detalla las estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (0,0,0)x(0,1,1)s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que los parámetros del modelo ARIMA fueron significativos (con Sig.< 0.05).

Tabla 4.16: Estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (0,0,0)x(0,1,1)s

Parámetros del modelo ARIMA				Estimación	SE	t	Sig.
Caudal turbinado- Modelo_1	Caudal turbinado	Ninguna transformación	Constante	,637	,289	2,200	,031
			Diferencia estacional	1			
			MA, estacional Retardo 1	,577	,118	4,885	,000

La ecuación del modelo ARIMA (0,0,0)x(0,1,1)s para la serie CAUDAL TURBINADO se muestra en la siguiente ecuación:

$$(1 - L^{12})CAUDAL_TURB_t = \theta_0 + (1 - \theta L^{12})a_t \quad (32)$$

$$(1 - L^{12})CAUDAL_TURB_t = 0.637 + (1 - 0.577L^{12})a_t \quad (33)$$

Sea $Z_t = CAUDAL_TURB_t$

$$Z_t = 0.637 + Z_{t-12} + a_t - 0.577a_{t-12} \quad (34)$$

5.2.3. VERIFICACIÓN

En esta etapa se busca verificar si modelo ajustado obtenido es apropiado para datos. La verificación puede ser hecha analizando los residuos. Si el modelo ajustado fuera adecuado, los residuos deberán comportarse como ruido blanco (media cero además varianza constante) y, por tanto, deberán ser aproximadamente no correlacionados.

Una forma de comprobar si los residuos no están correlacionados es observar sus correlogramas (autocorrelaciones simples y autocorrelaciones parciales) de los residuos.

Figura 4.24 se detalla gráfica de los residuos, se aprecia que los valores están alrededor de un valor medio igual a cero y presentan aleatoriedad.

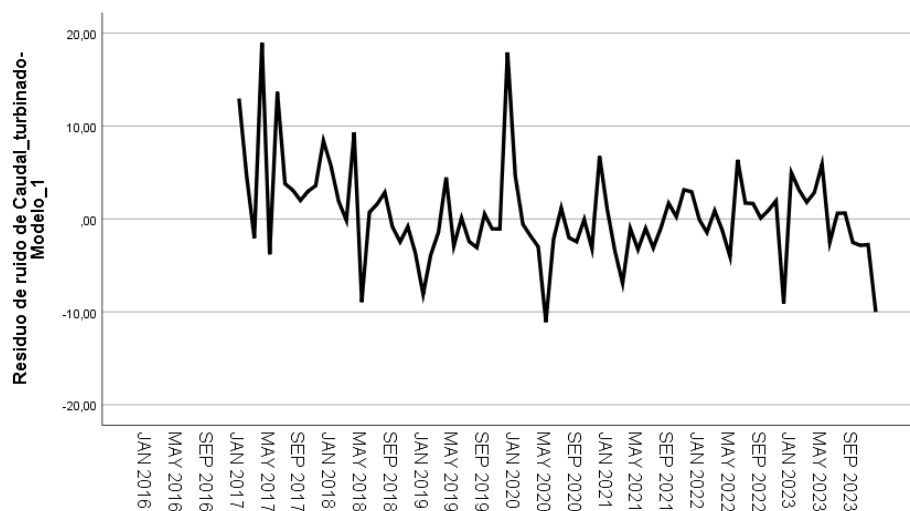


Figura 4.24: Gráfico de residuos modelo ajustado ARIMA (0,0,0)x(0,1,1)s, a la serie CAUDAL TURBINADO

En la figura 4.25 se presenta autocorrelaciones simples y autocorrelaciones parciales de residuos del modelo ajustado, se visualiza que coeficientes estimados son estadísticamente nulos por lo que no sobresalen de los límites superior e inferior de las bandas, dicha gráfica evidencia que los residuos no están correlacionados y por lo que se llegan a comportar como ruido blanco (varianza constante además media cero).

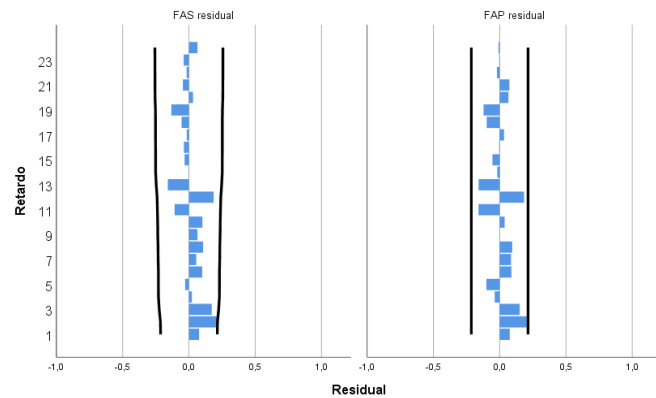


Figura 4.25: Autocorrelación simple (izquierda) y autocorrelación parcial (derecha) de residuos de modelo ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)s, serie CAUDAL TURBINADO

Después de las comprobaciones, podemos concluir que el modelo ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)s tiene un ajuste adecuado a serie temporal del caudal turbinado, por lo que, es modelo que usaremos para predecir valores futuros de la serie.

5.2.4. PREDICCIÓN

El cálculo de las predicciones de la serie temporal CAUDAL TURBINADO, utilizando el modelo ARIMA ajustado, se realiza a partir de las expresiones matemáticas obtenidas en el proceso de estimación y ajuste, en nuestro caso, hemos seleccionado el modelo óptimo (0,0,0)x(0,1,1)s y puede ser un buen modelo predictivo, luego la ecuación tiene la siguiente forma.

Sea modelo ajustado ARIMA (0,0,0)x(0,1,1)s, la cual tiene la estructura:

$$Z_t = 0.637 + Z_{t-12} + a_t - 0.577a_{t-12} \quad (35)$$

Donde $Z_t = \ln_CAUDAL_t$

Despejando Z_t , se tendrá el pronóstico respectivo, $\hat{Z}_{t+h}$, siendo $h=1,2,3, \dots$

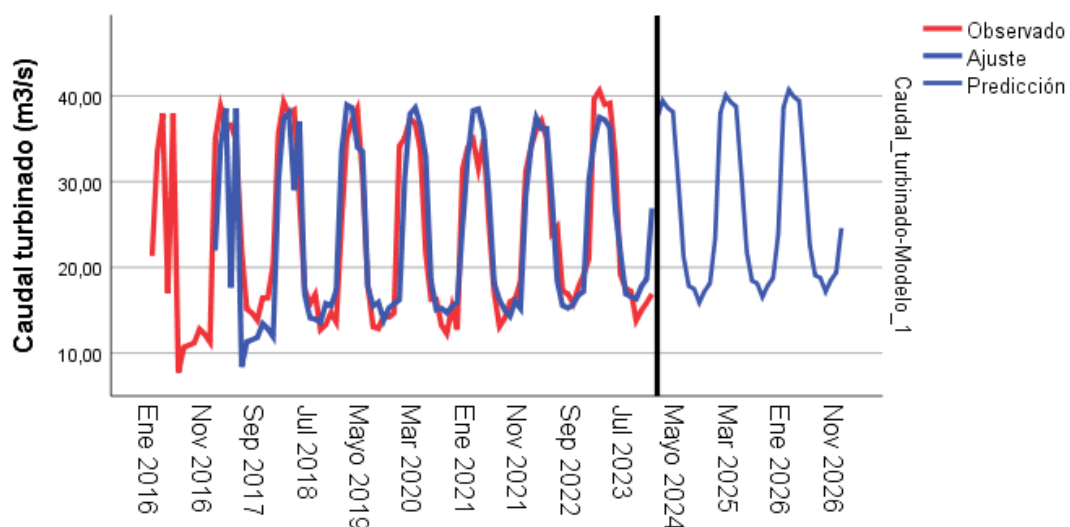


Figura 4.26: Gráfico de serie observada, ajustada asimismo los pronósticos (2024 al 2026)

S
Tabla 4.17: Pronóstico del caudal turbinado

PRONOSTICOS 2024 – 2026: Caudal turbinado (m³/s)			
Modelo	Caudal turbinado-Modelo_1		
	Predicción	UCL	LCL
Ene 2024	37.42	47.27	27.57
Feb 2024	39.45	49.30	29.60
Mar 2024	38.60	48.45	28.75
Abr 2024	38.14	47.99	28.29
May 2024	30.05	39.91	20.20
Jun 2024	21.27	31.12	11.42
Jul 2024	17.80	27.65	7.95
Ago 2024	17.50	27.35	7.65
Sep 2024	15.90	25.76	6.05
Oct 2024	17.26	27.11	7.41
Nov 2024	18.12	27.97	8.27
Dic 2024	23.31	33.16	13.46
Ene 2025	38.06	48.75	27.36
Feb 2025	40.09	50.78	29.39
Mar 2025	39.24	49.93	28.54
Abr 2025	38.77	49.47	28.08
May 2025	30.69	41.39	20.00
Jun 2025	21.90	32.60	11.21
Jul 2025	18.44	29.13	7.74
Ago 2025	18.14	28.83	7.44
Sep 2025	16.54	27.24	5.85
Oct 2025	17.89	28.59	7.20

Nov 2025	18.76	29.45	8.06
Dic 2025	23.95	34.65	13.26
Ene 2026	38.70	50.17	27.22
Feb 2026	40.73	52.20	29.25
Mar 2026	39.88	51.35	28.40
Abr 2026	39.41	50.89	27.93
May 2026	31.33	42.80	19.85
Jun 2026	22.54	34.02	11.06
Jul 2026	19.07	30.55	7.60
Ago 2026	18.77	30.25	7.30
Sep 2026	17.18	28.65	5.70
Oct 2026	18.53	30.01	7.06
Nov 2026	19.39	30.87	7.92
Dic 2026	24.59	36.06	13.11

5.3. POTENCIA EFECTIVA

Datos de serie temporal potencia efectiva se obtuvo de la central hidroeléctrica de El Platanal, desde enero de 2016 hasta diciembre de 2023, se tiene 96 observaciones los cuales se muestran en la figura 4.27

La serie POTENCIA EFECTIVA, de acuerdo con los datos obtenidos no presenta una tendencia marcada y presenta una varianza homogénea en el tiempo, con respecto a la estacionalidad de los datos, la serie si presenta estacionalidad de periodo 12 meses. La serie muestra un marcado patrón estacional, ya que los niveles de potencia efectiva alcanzan su punto máximo en meses febrero y marzo.

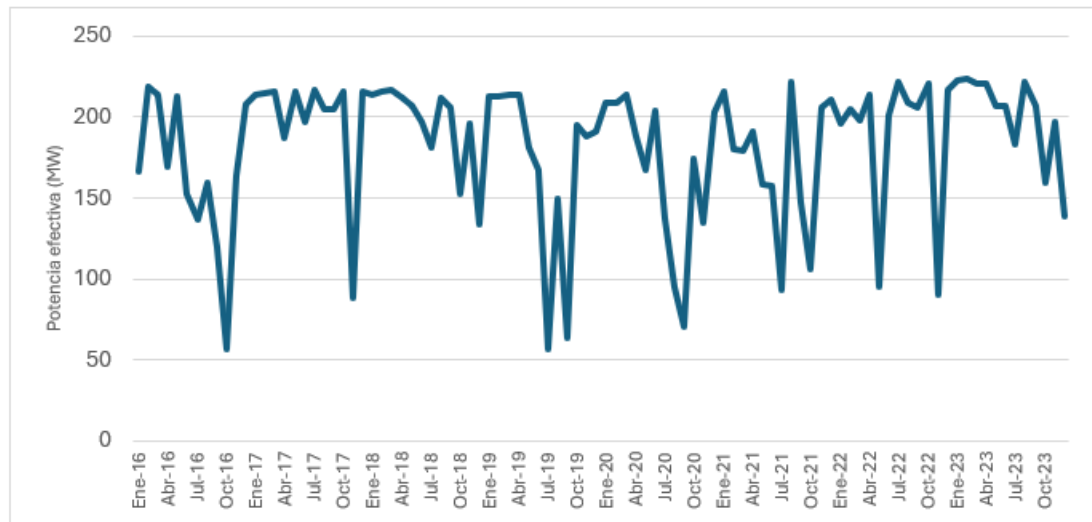


Figura 4.27: Serie temporal de la potencia efectiva, del 2016 al 2023

La tabla 4.18 presenta las estadísticas calculadas para la serie potencia efectiva. Los datos muestran que se obtuvo un nivel de potencia efectiva promedio de 182.39 (MW). Del resultado se puede observar que, el nivel de potencia efectiva mínimo fue de 56.8 (MW) y un máximo de 223.73 (MW).

Tabla 4.18: Estadísticas de la serie potencia efectiva

Estadísticos descriptivos					
Potencia efectiva (MW)	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
Potencia	96	56,80	223,73	182,3900	42,90803
N válido (por lista)	96				

La metodología del modelo ARIMA requiere que serie temporal sea estacionaria en media además varianza, y libre de estacionalidad.

Analizando la serie POTENCIA EFECTIVA se evidenció que es estacionaria en media asimismo varianza, pero presenta estacionalidad. Entonces, la serie no será

diferenciada en la parte regular, pero si diferenciada en la parte estacional ($d=0$ y $D=1$), siendo el modelo $ARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ con componente regular y estacional, de la forma $ARIMA(p,0,q) \times (P,1,Q)_s$.

5.3.1. IDENTIFICACIÓN DE MODELO

En la identificación del modelo ARIMA se emplean función de autocorrelación simple ACF asimismo función de autocorrelación parcial ACFP de serie POTENCIA EFECTIVA diferenciada estacionalmente, que se muestran en las figuras 4.41 y 4.42

Para analizar la parte regular de la serie, se observa que las autocorrelaciones simples no son significativas, esto sugiere que la serie no tendría parte media móvil regular, y se ve también que las autocorrelaciones parciales no son significativas, esto sugiere que esta serie temporal no tendría parte autorregresiva regular, por lo tanto, se considera para la parte regular de la serie un modelo de la forma $ARMA(0,0)$ con $p=0$ y $q=0$. Para analizar la parte estacional en base a los rezagos estacionales, se puede observar que la autocorrelación simple del rezago 12 (primer rezago estacional) es bastante significativa, esto sugiere que la serie tiene una parte de media móvil estacional de la forma $MA(1)_s$; y se ve que las autocorrelaciones parciales estacional (periodo 12, 24) son significativas, por lo que se toma esos dos rezagos estacionales (periodo 12 y periodo 24), esto sugiere que la serie tiene parte autorregresiva estacional de la forma $AR(2)_s$, por lo tanto, una alternativa para parte estacional de serie será un modelo de la forma $ARMA(2,1)_s$ con $P=2$ y $Q=1$.

Luego, el orden del modelo a ajustar es, $ARIMA(0,0,0) \times (2,1,1)_s$.

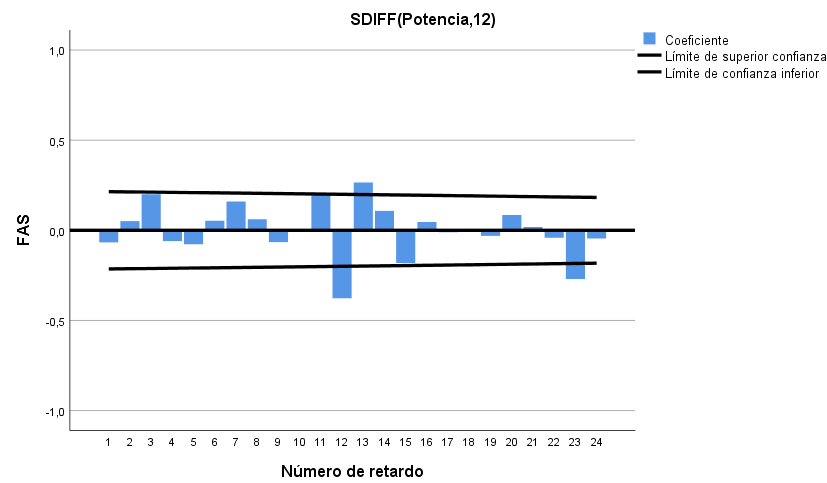


Figura 4.28: Autocorrelaciones simples de la serie POTENCIA EFECTIVA diferenciada estacionalmente

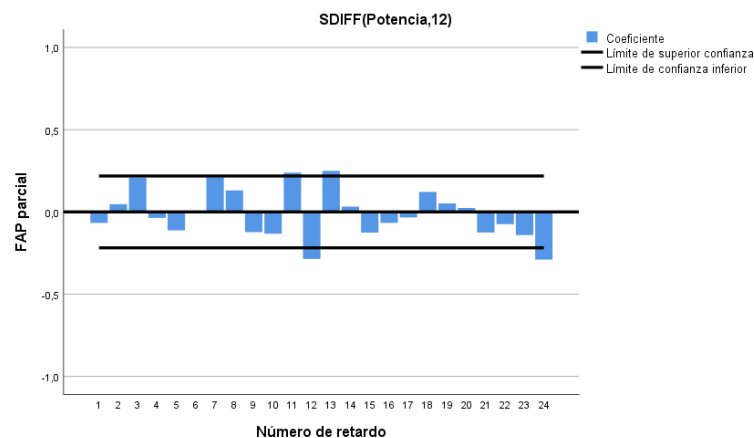


Figura 4.29: Autocorrelaciones parciales de la serie POTENCIA EFECTIVA diferenciada estacionalmente

5.3.2. ESTIMACIÓN

En esta etapa se realiza estimación de parámetros en modelos ARIMA. Se especificó modelo para la serie POTENCIA EFECTIVA, de la forma ARIMA (0,0,0)x(2,1,1)s.

Tabla 4.19 se detalla las estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (0,0,0)x(2,1,1)s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que los parámetros del modelo ARIMA fueron no significativos (con

Sig.>0.05), pero se tuvo un buen comportamiento de los residuos del modelo y de los pronósticos.

Tabla 4.19: Estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (0,0,0)x(2,1,1)s

Parámetros del modelo ARIMA					Estimación	SE	t	Sig.
Potencia-Modelo_1	Potencia	Ninguna transformación	Constante		1,473	1,852	,795	,429
			AR, estacional	Retardo 1	,034	,229	,148	,882
				Retardo 2	-,105	,184	-,574	,568
			Diferencia estacional		1			
			MA, estacional	Retardo 1	,986	5,438	,181	,857

La ecuación del modelo ARIMA (0,0,0)x(2,1,1)s para la serie POTENCIA EFECTIVA se muestra en la siguiente ecuación:

$$(1 - \phi_1 L^{12} - \phi_2 L^{24})(1 - L^{12})POTENCIA_t = \theta_0 + (1 - \theta L^{12})a_t \quad (36)$$

$$(1 - 0.034L^{12} + 0.105L^{24})(1 - L^{12})POTENCIA_t = 1.473 + (1 - 0.986L^{12})a_t \quad (37)$$

Sea $Z_t = POTENCIA_t$

$$Z_t = 1.473 + 1.034Z_{t-12} - 0.139Z_{t-24} + 0.105Z_{t-36} + a_t - 0.986a_{t-12} \quad (38)$$

5.3.3. VERIFICACIÓN

En esta etapa se busca verificar si modelo ajustado obtenido es apropiado para datos. La verificación puede ser hecha analizando los residuos. Si el modelo ajustado fuera adecuado, los residuos deberán comportarse como ruido blanco (media cero además varianza constante) y, por tanto, deberán ser aproximadamente no correlacionados.

Figura 4.30 se detalla la gráfica de residuos, se aprecia que valores están alrededor de un valor medio igual a cero y presentan aleatoriedad.

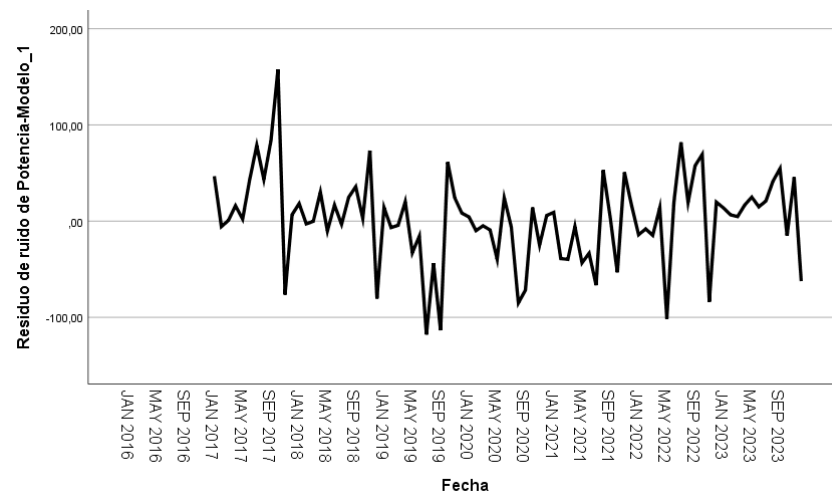


Figura 4.30: Gráfico residuos de modelo ajustado ARIMA (0,0,0)x(2,1,1)s, a serie POTENCIA EFECTIVA

En la figura 4.31 se presenta autocorrelaciones simples y autocorrelaciones parciales de residuos del modelo ajustado, se visualiza que casi totalidad de coeficientes estimados son estadísticamente nulos por lo que no sobresalen de límites inferior y superior de bandas, dicha grafica evidencia que los residuos no están correlacionados y por lo tanto se manifiestan como ruido blanco (varianza constante además media cero).

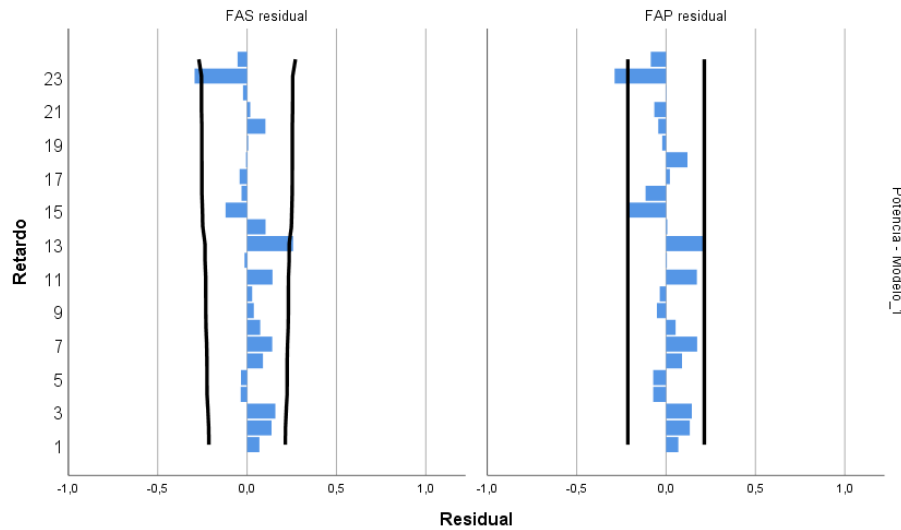


Figura 4.31: Autocorrelación simple (izquierda) y autocorrelación parcial (derecha) de residuos de modelo ARIMA(0,0,0)x(2,1,1)s, serie POTENCIA EFECTIVA

Después de las comprobaciones, podemos concluir que el modelo ARIMA(0,0,0)x(2,1,1)s tiene un ajuste adecuado a serie temporal potencia efectiva, por lo que, es modelo que usaremos para predecir valores futuros de la serie.

5.3.4. PREDICCIÓN

El cálculo de las predicciones de la serie temporal POTENCIA EFECTIVA, utilizando el modelo ARIMA ajustado, se realiza a partir de las expresiones matemáticas obtenidas en el proceso de estimación y ajuste, en nuestro caso, hemos seleccionado el modelo óptimo (0,0,0)x(2,1,1)s y puede ser un buen modelo predictivo, luego la ecuación tiene la siguiente forma.

Sea modelo ajustado ARIMA (0,0,0)x(2,1,1)s, la cual tiene la estructura,

$$Z_t = 1.473 + 1.034Z_{t-12} - 0.139Z_{t-24} + 0.105Z_{t-36} + a_t - 0.986a_{t-12} \quad (39)$$

Donde $Z_t = POTENCIA_t$

Despejando Z_t , se tendrá el pronóstico respectivo, $\hat{Z}_{t+h}$, siendo $h=1,2,3, \dots$

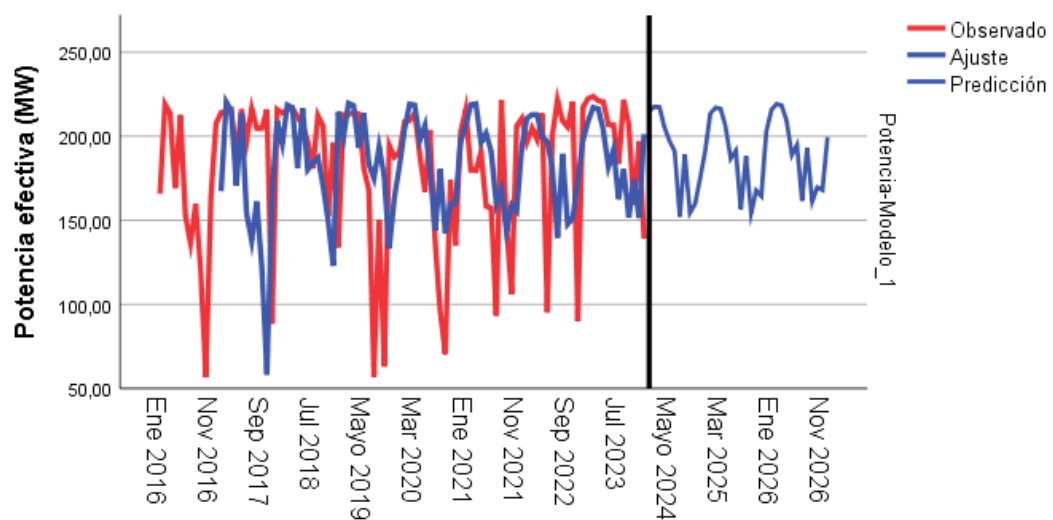


Figura 4.32: Gráfico de serie observada, ajustada asimismo los pronósticos (2024 al 2026)

Tabla 4.20: Pronóstico de la potencia efectiva

PRONOSTICOS 2024–2026: Potencia efectiva (MW)			
Modelo	Potencia-Modelo_1		
	Predicción	UCL	LCL
Ene 2024	214.94	299.81	130.07
Feb 2024	217.64	302.51	132.77
Mar 2024	217.41	302.28	132.54
Abr 2024	205.35	290.22	120.48
May 2024	197.20	282.07	112.32
Jun 2024	191.07	275.95	106.20
Jul 2024	152.12	236.99	67.25
Ago 2024	189.08	273.95	104.21
Sep 2024	154.51	239.38	69.63
Oct 2024	159.74	244.61	74.87
Nov 2024	174.87	259.74	90.00
Dic 2024	191.46	276.33	106.59
Ene 2025	213.52	298.78	128.26
Feb 2025	217.01	302.27	131.75
Mar 2025	216.43	301.69	131.16
Abr 2025	205.67	290.93	120.41
May 2025	186.68	271.94	101.41
Jun 2025	191.49	276.75	106.23
Jul 2025	156.63	241.89	71.37
Ago 2025	188.22	273.48	102.95
Sep 2025	154.20	239.46	68.94
Oct 2025	167.80	253.06	82.53
Nov 2025	164.42	249.68	79.15
Dic 2025	203.06	288.32	117.80
Ene 2026	215.84	300.50	131.17
Feb 2026	219.21	303.87	134.55
Mar 2026	218.36	303.02	133.70
Abr 2026	208.86	293.52	124.19
May 2026	188.92	273.58	104.26
Jun 2026	194.73	279.39	110.07
Jul 2026	161.68	246.34	77.02
Ago 2026	193.21	277.87	108.54
Sep 2026	161.25	245.91	76.59
Oct 2026	169.60	254.27	84.94
Nov 2026	167.98	252.64	83.32
Dic 2026	199.51	284.17	114.85

5.4. ENERGÍA GENERADA

La información de la serie temporal energía generada corresponde a la central hidroeléctrica de El Platanal, desde enero de 2016 hasta diciembre de año 2023, se tiene 96 observaciones los cuales se muestran en la figura 4.46

La serie ENERGÍA GENERADA, de acuerdo con los datos obtenidos no presenta una tendencia marcada y presenta una varianza homogénea en el tiempo, con respecto a la estacionalidad de los datos, la serie si presenta estacionalidad de periodo 12 meses. La serie muestra un marcado patrón estacional, ya que los niveles de energía del caudal alcanzan su punto máximo en meses de marzo hasta abril.

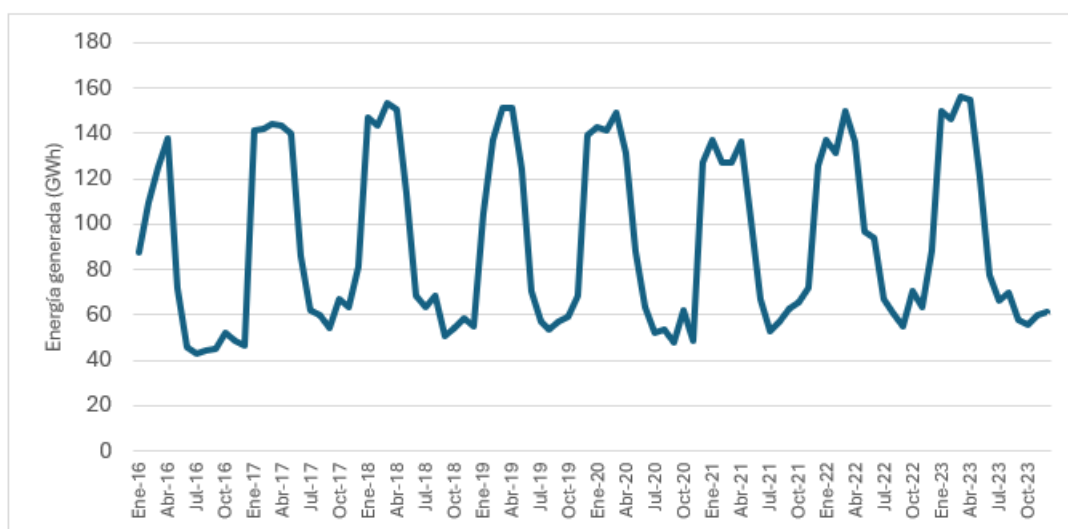


Figura 4.33: Serie temporal de la energía generada, del 2016 al 2023

La tabla 4.21 presenta las estadísticas calculadas para la serie energía generada. Los datos muestran que se obtuvo un nivel de energía generada promedio de aproximadamente 92.80 (GWh). Del resultado se puede observar que, el nivel de energía generada mínimo fue de 43.0 (GWh) y un máximo de 156.45 (GWh).

Tabla 4.21: Estadísticas de la serie energía generada

Energía generada (GWh)	Estadísticos descriptivos				Desv. Desviación
	N	Mínimo	Máximo	Media	
Energía	96	43,00	156,45	92,7956	38,69139
N válido (por lista)	96				

Analizando la serie ENERGÍA GENERADA se evidenció que es estacionaria en media y varianza, pero presenta estacionalidad. Entonces, la serie no será diferenciada en la parte regular, pero si diferenciada en la parte estacional ($d=0$ y $D=1$), siendo el modelo $ARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ con componente regular y estacional, de la forma $ARIMA(p,0,q) \times (P,1,Q)_s$.

5.4.1. IDENTIFICACIÓN DE MODELO

Se utiliza en identificación de modelo, función de autocorrelación simple ACF asimismo función de autocorrelación parcial ACFP de serie ENERGÍA GENERADA diferenciada estacionalmente, que se muestran en las figuras 4.47 y 4.48

Para analizar la parte regular de la serie, se observa que primera autocorrelación simple es significativa, esto sugiere que la serie tendría parte media móvil regular de orden $MA(1)$, y se ve también que la autocorrelación parcial del primer rezago es significativa, esto sugiere que esta serie temporal tiene parte autorregresiva regular de orden $AR(1)$, por lo tanto, se considera para la parte regular de la serie un modelo de la forma $ARMA(1,1)$ con $p=1$ y $q=1$. Para analizar la parte estacional en base a los rezagos estacionales, se puede observar que la autocorrelación simple del rezago 12 (primer rezago estacional) es significativa, esto sugiere que la serie tiene una parte

de media móvil estacional de la forma $MA(1)_s$; y se ve que las autocorrelaciones parciales estacionales (periodo 12, 24) no son significativas, esto sugiere que la serie no tiene parte autorregresiva estacional, por lo tanto, una alternativa para parte estacional de serie será un modelo de la forma $ARMA(0,1)_s$ con $P=0$ y $Q=1$.

Luego, el orden del modelo a ajustar es, $ARIMA(1,0,1) \times (0,1,1)_s$.

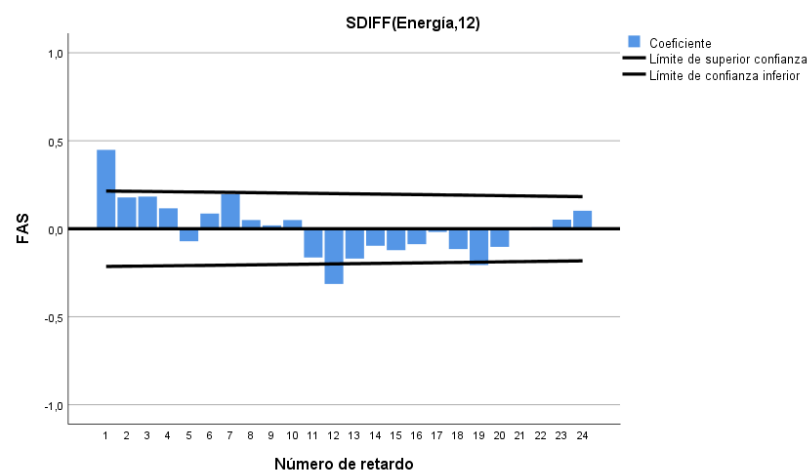


Figura 4.34: Autocorrelaciones simples de la serie ENERÍA GENERADA diferenciada estacionalmente

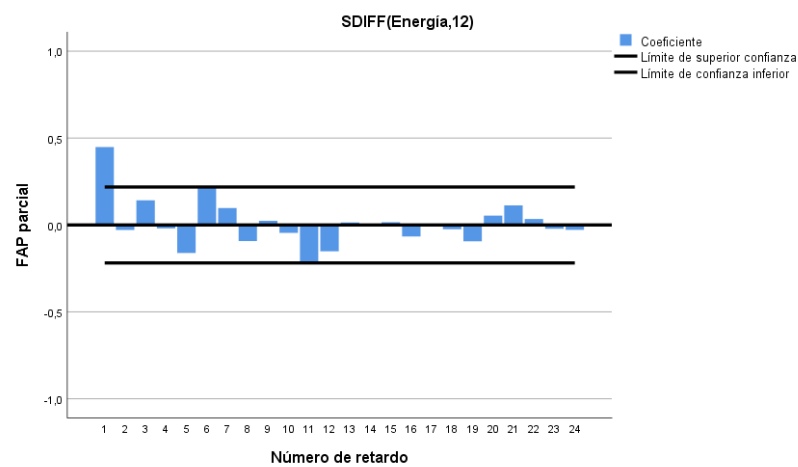


Figura 4.35: Autocorrelaciones parciales de la serie ENERÍA GENERADA diferenciada estacionalmente

5.4.2. ESTIMACIÓN

En esta etapa se realiza estimación de parámetros en modelos ARIMA. Se especificó el modelo para la serie ENERGÍA GENERADA, de la forma ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s.

En tabla 4.22 se detallan las estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que algunos de los parámetros del modelo ARIMA fueron significativos (con Sig. < 0.05), pero se tuvo un buen comportamiento de los residuos del modelo y de los pronósticos.

Tabla 4.22: Estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s

Parámetros del modelo ARIMA				Estimación	SE	t	Sig.
Energía-Modelo_1	Energía	Ninguna transformación	Constante	2,073	1,172	1,769	,081
			AR Retardo 1	,533	,243	2,195	,031
			MA Retardo 1	,162	,290	,558	,578
			Diferencia estacional	1			
			MA, estacional Retardo 1	,902	,306	2,948	,004

La ecuación del modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s para la serie ENERGIA GENERADA se muestra en la siguiente ecuación:

$$(1 - \phi L)(1 - L^{12})ENERGIA_t = \theta_0 + (1 - \theta L)(1 - \theta L^{12})a_t \quad (40)$$

$$(1 - 0.533L)(1 - L^{12})ENERGIA_t = 2.073 + (1 - 0.162L)(1 - 0.902L^{12})a_t \quad (41)$$

Sea $Z_t = ENERGIA_t$

$$Z_t = 2.073 + 0.533Z_{t-1} + Z_{t-12} - 0.533Z_{t-13} + a_t - 0.162a_{t-1} - 0.902a_{t-12} + 0.146a_{t-13} \quad (42)$$

5.4.3. VERIFICACIÓN

En esta etapa se busca comprobar si modelo ajustado obtenido es apropiado para datos. La verificación puede ser hecha analizando los residuos. Si el modelo ajustado fuera adecuado, los residuos deberán comportarse como ruido blanco (media cero además varianza constante) y, por tanto, deberán ser aproximadamente no correlacionados.

Figura 4.36 se detalla la gráfica de residuos, se aprecia que valores están alrededor de un valor medio igual a cero y presentan aleatoriedad.

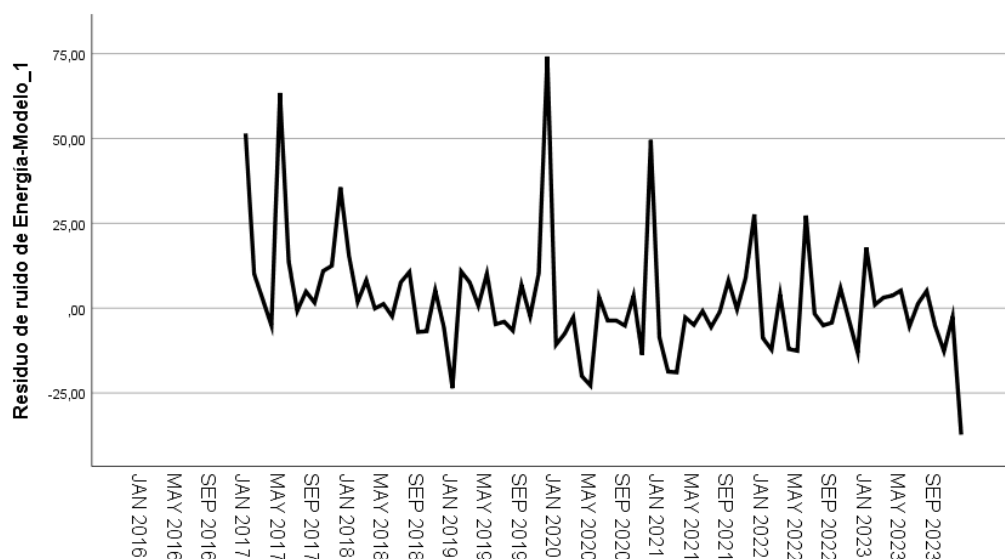


Figura 4.36: Gráfico residuos de modelo ajustado ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s, a la serie ENERGIA GENERADA

En la figura 4.37 se presenta autocorrelaciones simples asimismo autocorrelaciones parciales de residuos del modelo ajustado, se observa que casi la totalidad de los coeficientes estimados son estadísticamente nulos por lo que no sobresalen de límites inferior y superior de bandas, dicha grafica evidencia que los residuos no están correlacionados y por lo que se manifiestan como ruido blanco (varianza constante asimismo media cero).

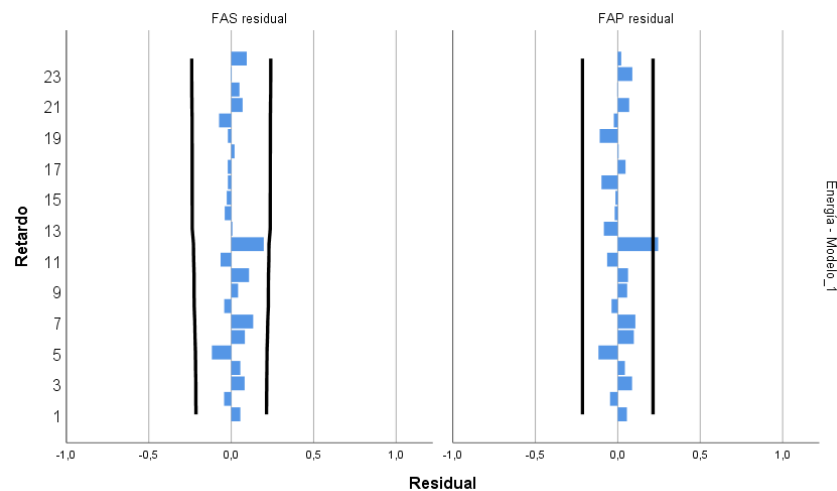


Figura 4.37: Autocorrelación simple (izquierda) además autocorrelación parcial (derecha) de residuos de modelo ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)s, serie ENERGIA GENERADA

Después de las comprobaciones, podemos concluir que el modelo ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)s tiene un ajuste adecuado a serie temporal energía generada, por lo que, es modelo que usaremos para predecir valores futuros de la serie.

5.4.4. PREDICCIÓN

El cálculo de las predicciones de la serie temporal ENERGÍA GENERADA, utilizando el modelo ARIMA ajustado, se realiza a partir de las expresiones matemáticas obtenidas en el proceso de estimación y ajuste, en este caso, se ha seleccionado el modelo óptimo (1,0,1)x(0,1,1)s y puede ser un buen modelo predictivo, luego la ecuación tiene la siguiente forma.

Sea modelo ajustado ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s, la cual tiene la estructura:

$$Z_t = 2.073 + 0.533Z_{t-1} + Z_{t-12} - 0.533Z_{t-13} + a_t - 0.162a_{t-1} - 0.902a_{t-12} + 0.146a_{t-13} \quad (43)$$

Sea $Z_t = ENERGIA_t$

Despejando Z_t , se tendrá el pronóstico respectivo, $\hat{Z}_{t+h}$, siendo $h=1,2,3, \dots$

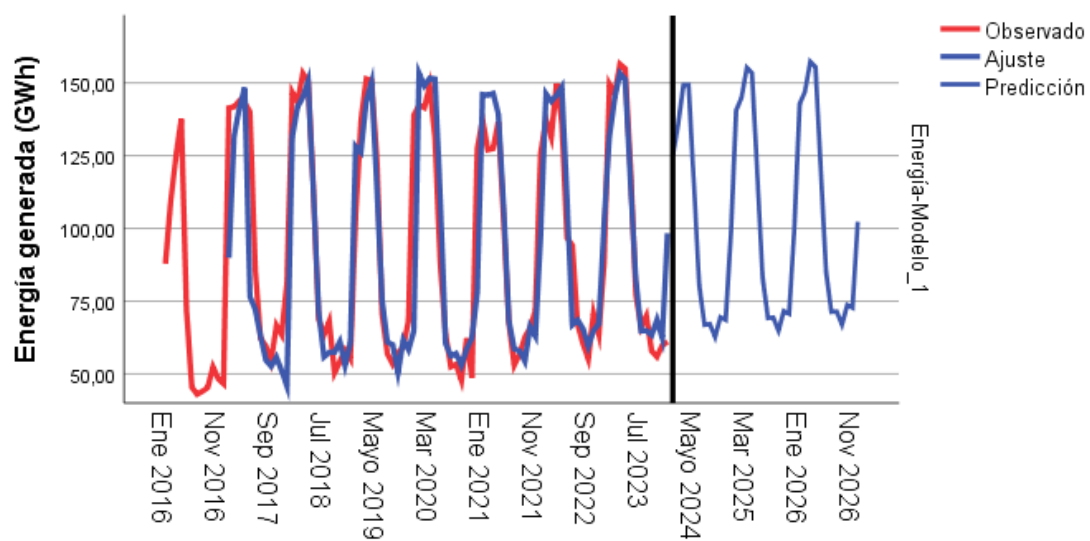


Figura 4.38: Gráfico de serie observada, ajustada asimismo los pronósticos (2024 al 2026)

Tabla 4.23: Pronóstico de la energía generada

PRONOSTICOS 2024 – 2026: Energía generada (GWh)			
Modelo	Energía-Modelo_1		
	Predicción	UCL	LCL
Ene 2024	125.14	156.26	94.03
Feb 2024	135.60	168.76	102.43
Mar 2024	149.34	183.06	115.62
Abr 2024	149.30	183.18	115.43
May 2024	114.99	148.91	81.07
Jun 2024	80.41	114.35	46.48
Jul 2024	66.85	100.78	32.91
Ago 2024	67.17	101.10	33.23
Sep 2024	62.68	96.62	28.74
Oct 2024	69.48	103.41	35.54
Nov 2024	68.54	102.47	34.61
Dic 2024	98.14	132.05	64.23
Ene 2025	140.70	174.75	106.66
Feb 2025	144.85	178.93	110.77
Mar 2025	155.24	189.33	121.15
Abr 2025	153.42	187.51	119.32
May 2025	118.15	152.24	84.05
Jun 2025	83.07	117.16	48.97
Jul 2025	69.23	103.32	35.13
Ago 2025	69.40	103.50	35.31
Sep 2025	64.84	98.93	30.75
Oct 2025	71.60	105.69	37.51
Nov 2025	70.64	104.73	36.56
Dic 2025	100.22	134.29	66.16
Ene 2026	142.78	176.98	108.59
Feb 2026	146.93	181.13	112.73
Mar 2026	157.31	191.52	123.10
Abr 2026	155.49	189.70	121.28
May 2026	120.22	154.43	86.01
Jun 2026	85.14	119.35	50.93
Jul 2026	71.30	105.51	37.09
Ago 2026	71.48	105.69	37.27
Sep 2026	66.91	101.12	32.70
Oct 2026	73.67	107.88	39.46
Nov 2026	72.71	106.92	38.51
Dic 2026	102.30	136.48	68.11

5.5. FACTOR DE PLANTA

Datos de la serie temporal factor de planta corresponde a la central hidroeléctrica de El Platanal, de enero de 2016 hasta diciembre de 2023, se tiene 96 observaciones los cuales se muestran en la figura 4.39

La serie FACTOR DE PLANTA, de acuerdo con los datos obtenidos no presenta una tendencia marcada y presenta una varianza homogénea en el tiempo, con respecto a la estacionalidad de los datos, la serie si presenta estacionalidad de periodo 12 meses. La serie muestra un marcado patrón estacional, ya que los niveles de factor de planta alcanzan su valor máximo en meses de marzo hasta abril.

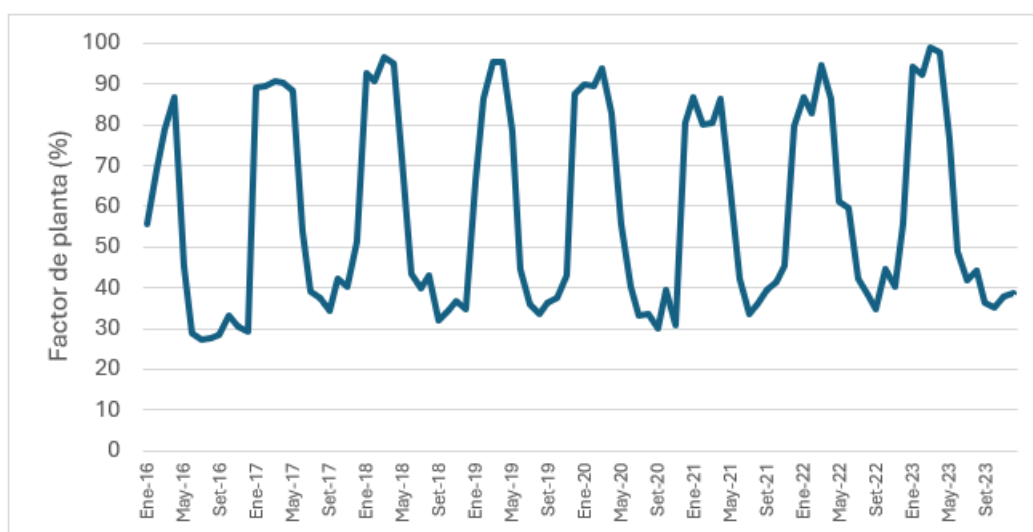


Figura 4.39: Serie temporal del factor de planta, del 2016 al 2023

La tabla 4.24 presenta las estadísticas calculadas para la serie factor de planta mensual. Los datos muestran que se obtuvo un factor de planta mensual promedio de aproximadamente 58.58%. Del resultado se puede observar que, el factor de planta mínimo fue de 27.1% y un máximo de 98.8%.

Tabla 4.24: Estadísticas de la serie factor de planta

Estadísticos descriptivos					
Factor de planta (%)	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
Factor de planta (%)	96	27,1	98,8	58,583	24,4264
N válido (por lista)	96				

Analizando la serie FACTOR DE PLANTA se observó que es estacionaria en media y varianza, pero presenta estacionalidad. Entonces, la serie no será diferenciada en la parte regular, pero si diferenciada en la parte estacional ($d=0$ y $D=1$), siendo el modelo $ARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ con componente regular y estacional, de la forma $ARIMA(p,0,q) \times (P,1,Q)_s$.

5.5.1. IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

Se utiliza en identificación de modelo función de autocorrelación simple ACF asimismo función de autocorrelación parcial ACFP de serie FACTOR DE PLANTA diferenciada estacionalmente, que se muestran en las figuras 4.40 y 4.41

Para analizar la parte regular de la serie, se observa que primera autocorrelación simple es significativa, esto sugiere que la serie tiene parte media móvil regular de orden $MA(1)$, y se ve también que la autocorrelación parcial del primer rezago es significativa, esto sugiere que esta serie temporal tiene parte autorregresiva regular de orden $AR(1)$, por lo tanto, se considera para la parte regular de la serie un modelo de la forma $ARMA(1,1)$ con $p=1$ y $q=1$. Para analizar la parte estacional en base a los rezagos estacionales, se puede observar que la autocorrelación simple del rezago 12 (primer rezago estacional) es significativa, esto sugiere que la serie tiene una parte de media móvil estacional de la forma $MA(1)_s$; y se ve que las autocorrelaciones parciales estacionales (periodo 12, 24) no son significativas, esto sugiere que la serie

no tiene parte autorregresiva estacional, por lo tanto, una alternativa para la parte estacional de la serie será un modelo de la forma $\text{ARMA}(0,1)_s$ con $P=0$ y $Q=1$.

Luego, el orden del modelo a ajustar es, $\text{ARIMA}(1,0,1)_s \times (0,1,1)_s$.

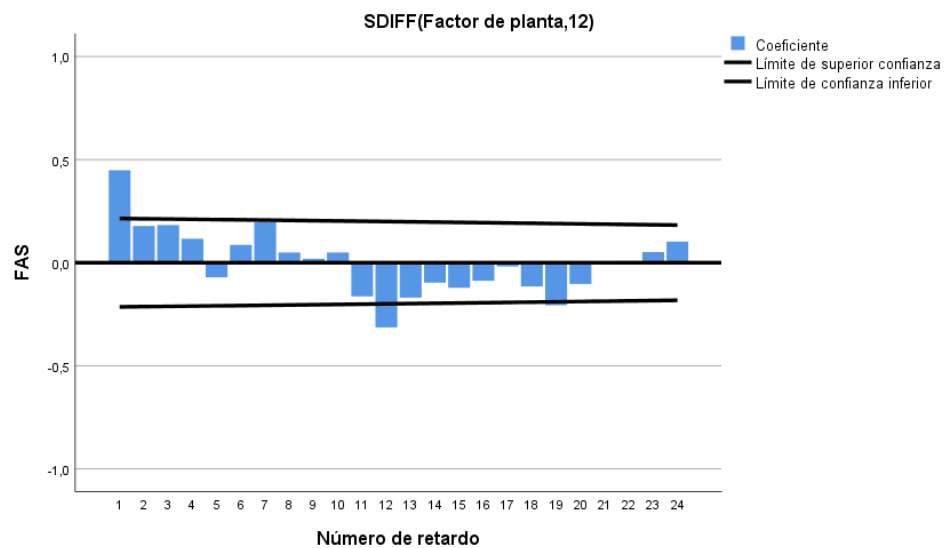


Figura 4.40: Autocorrelaciones simples de la serie FACTOR DE PLANTA diferenciada estacionalmente

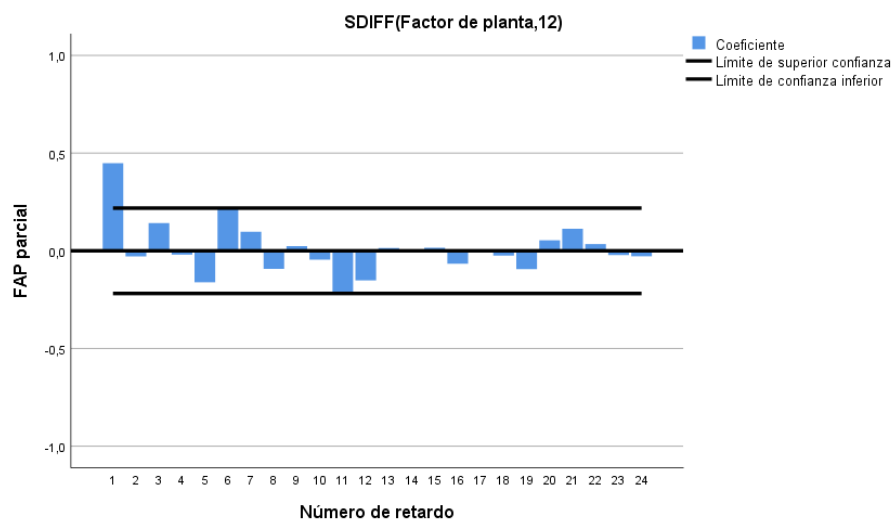


Figura 4.41: Autocorrelaciones parciales de la serie FACTOR DE PLANTA diferenciada estacionalmente

5.5.2. ESTIMACIÓN

En esta etapa se realiza estimación de parámetros en modelos ARIMA. Se especificó modelo para la serie FACTOR DE PLANTA, de la forma ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s.

Tabla 4.25 se muestra las estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que algunos de los parámetros del modelo ARIMA fueron significativos (con Sig.<0.05), pero se tuvo un buen comportamiento de los residuos del modelo y de los pronósticos.

Tabla 4.25: Estimaciones de parámetros de modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s

Parámetros del modelo ARIMA				Estimación	SE	t	Sig.
Factor de planta (%) Modelo_1	Factor de planta (%)	Ninguna transformación	Constante	1,309	,740	1,769	,081
			AR Retardo 1	,533	,243	2,195	,031
			MA Retardo 1	,162	,290	,558	,578
			Diferencia estacional	1			
			MA, estacional Retardo 1	,902	,306	2,948	,004

La ecuación del modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s para la serie FACTOR DE PLANTA se muestra en la siguiente ecuación:

$$(1 - \phi L)(1 - L^{12})FACT_PLAN_t = \theta_0 + (1 - \theta L)(1 - \theta L^{12})a_t \quad (44)$$

$$(1 - 0.533L)(1 - L^{12})FCAT_PLAN_t = 1.309 + (1 - 0.162L)(1 - 0.902L^{12})a_t \quad (45)$$

Sea $Z_t = FACT_PLAN_t$

$$Z_t = 1.309 + 0.533Z_{t-1} + Z_{t-12} - 0.533Z_{t-13} + a_t - 0.162a_{t-1} - 0.902a_{t-12} + 0.146a_{t-13} \quad (46)$$

5.5.3. VERIFICACIÓN

En esta etapa se busca verificar si modelo ajustado obtenido es apropiado para información. La verificación puede ser hecha analizando los residuos. Si el modelo ajustado fuera adecuado, los residuos deberán comportarse como ruido blanco (media cero además varianza constante) y, por tanto, deberán ser aproximadamente no correlacionados.

Figura 4.42 se muestra la gráfica de residuos, se aprecia que valores están alrededor de un valor medio igual a cero y presentan aleatoriedad.

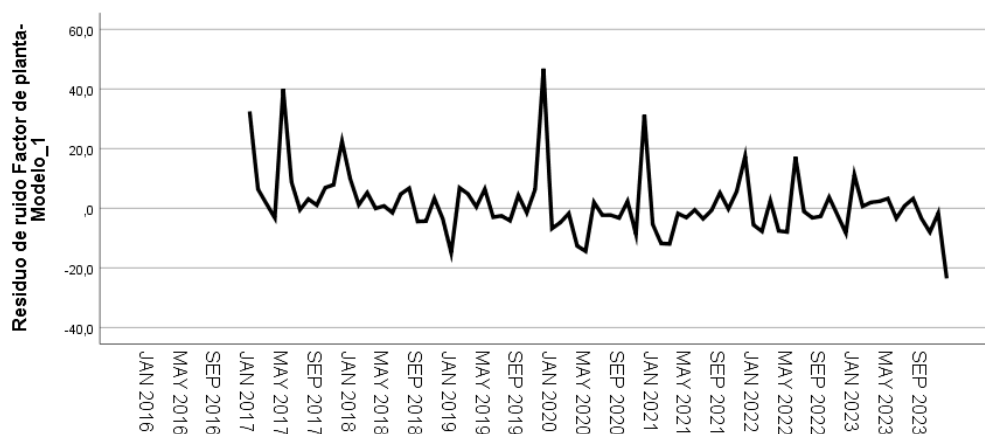


Figura 4.42: Gráfico residuos de modelo ajustado ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s, a la serie FACTOR DE PLANTA

En la figura 4.43 se presenta autocorrelaciones simples además autocorrelaciones parciales de residuos del modelo ajustado, se visualiza que casi totalidad de coeficientes estimados son estadísticamente nulos por lo que no sobresalen de límites inferior y superior de bandas, dicha grafica evidencia que los residuos no están correlacionados y por lo que se actúan como ruido blanco (varianza constante y media cero).

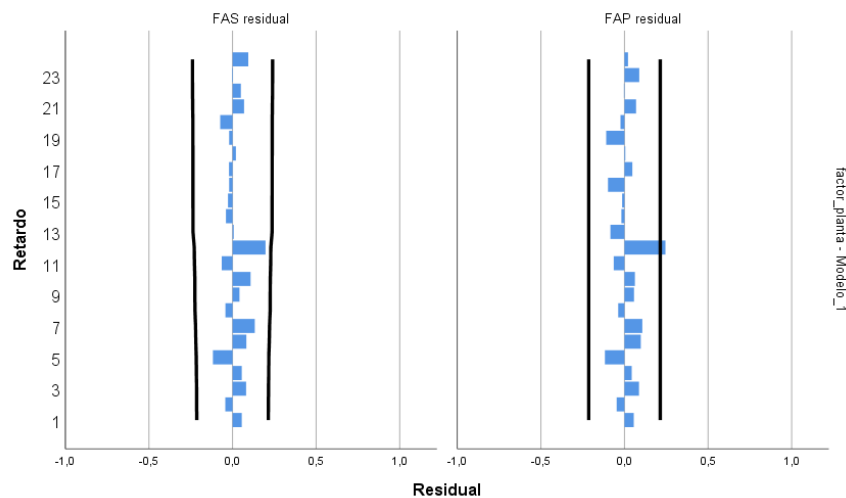


Figura 4.43: Autocorrelación simple (izquierda) asimismo autocorrelación parcial (derecha) de residuos de modelo ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)s, serie FACTOR DE PLANTA

Después de las comprobaciones, podemos concluir que el modelo ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)s tiene un ajuste adecuado a serie temporal factor de planta, por lo que, es modelo que usaremos para predecir valores futuros de la serie.

5.5.4. PREDICCIÓN

El cálculo de las predicciones de la serie temporal FACTOR DE PLANTA, utilizando el modelo ARIMA ajustado, se realiza a partir de las expresiones matemáticas obtenidas en el proceso de estimación y ajuste, en este caso, se ha seleccionado el modelo óptimo (1,0,1)x(0,1,1)s y puede ser un buen modelo predictivo, luego la ecuación tiene la siguiente forma.

Sea modelo ajustado ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s, la cual tiene la estructura:

$$Z_t = 1.309 + 0.533Z_{t-1} + Z_{t-12} - 0.533Z_{t-13} + a_t - 0.162a_{t-1} - 0.902a_{t-12} + 0.146a_{t-13} \quad (47)$$

Sea $Z_t = FACT_PLAN_t$

Despejando Z_t , se tendrá el pronóstico respectivo, $\hat{Z}_{t+h}$, siendo $h=1,2,3, \dots$

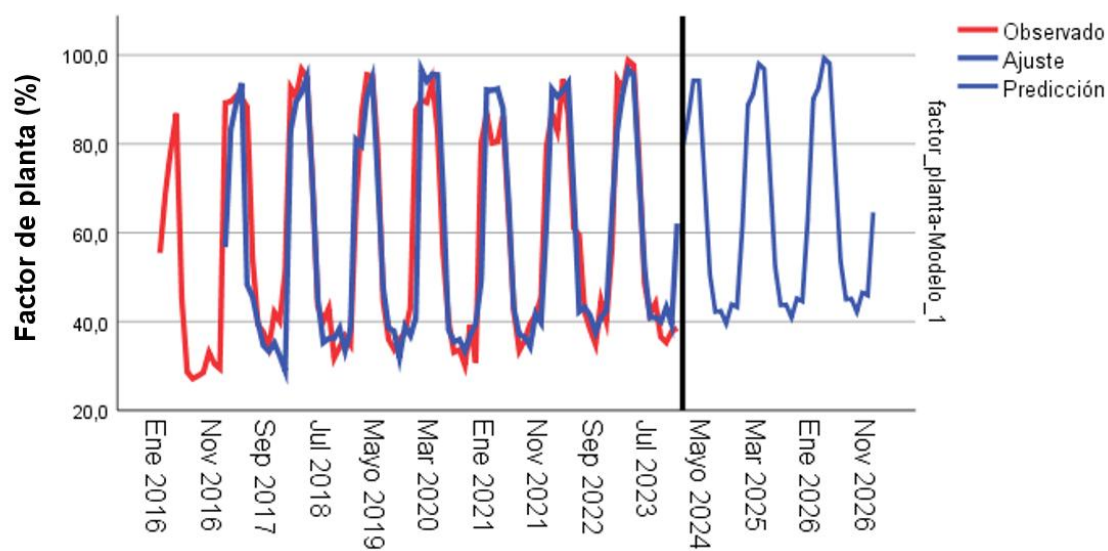


Figura 4.44: Gráfico de serie observada, ajustada asimismo los pronósticos (2024 al 2026)

Tabla 4.26: Pronóstico del factor de planta
PRONOSTICOS 2024–2026: Factor de planta (%)

Modelo	Factor de planta (%) - Modelo_1		
	Predicción	UCL	LCL
Ene 2024	79.0	98.6	59.4
Feb 2024	85.6	106.5	64.7
Mar 2024	94.3	115.6	73.0
Abr 2024	94.3	115.6	72.9
May 2024	72.6	94.0	51.2
Jun 2024	50.8	72.2	29.3
Jul 2024	42.2	63.6	20.8
Ago 2024	42.4	63.8	21.0
Sep 2024	39.6	61.0	18.1
Oct 2024	43.9	65.3	22.4
Nov 2024	43.3	64.7	21.9
Dic 2024	62.0	83.4	40.5
Ene 2025	88.8	110.3	67.3
Feb 2025	91.4	113.0	69.9
Mar 2025	98.0	119.5	76.5
Abr 2025	96.9	118.4	75.3
May 2025	74.6	96.1	53.1
Jun 2025	52.4	74.0	30.9
Jul 2025	43.7	65.2	22.2
Ago 2025	43.8	65.3	22.3
Sep 2025	40.9	62.5	19.4
Oct 2025	45.2	66.7	23.7
Nov 2025	44.6	66.1	23.1
Dic 2025	63.3	84.8	41.8
Ene 2026	90.1	111.7	68.6
Feb 2026	92.8	114.3	71.2
Mar 2026	99.3	120.9	77.7
Abr 2026	98.2	119.8	76.6
May 2026	75.9	97.5	54.3
Jun 2026	53.7	75.3	32.2
Jul 2026	45.0	66.6	23.4
Ago 2026	45.1	66.7	23.5
Sep 2026	42.2	63.8	20.6
Oct 2026	46.5	68.1	24.9
Nov 2026	45.9	67.5	24.3
Dic 2026	64.6	86.2	43.0

FASE 6: ANÁLISIS DE LAS LAGUNAS QUE ALIMENTARIAN A LA CENTRAL

Para alimentar a la central en época de estiaje se plantea alimentarlas con el agua de las microcuencas; estas microcuencas están ubicadas en unidad hidrográfica menor Alto Cañete, perteneciente a cuenca de río Cañete la cual ocupa superficie de 6,049.4 km². Esta se localiza en costa central del Perú en departamento de Lima, comprendida entre coordenadas UTM WGS84 Norte de 8543670 a 8676084 m y, UTM WGS84 Este de 347258 a 443640 m.

Cuenca de río Cañete correspondiente a vertiente de Pacífico y posee límites con correspondientes cuencas:

- Por el Norte: cuenca del río Mantaro
- Por el Este: cuenca río Mantaro – Cuenca del río San Juan
- Por el Sur: intercuenca Topará – Océano Pacífico
- Por el Oeste: cuenca río Omas y Mala – Océano Pacífico

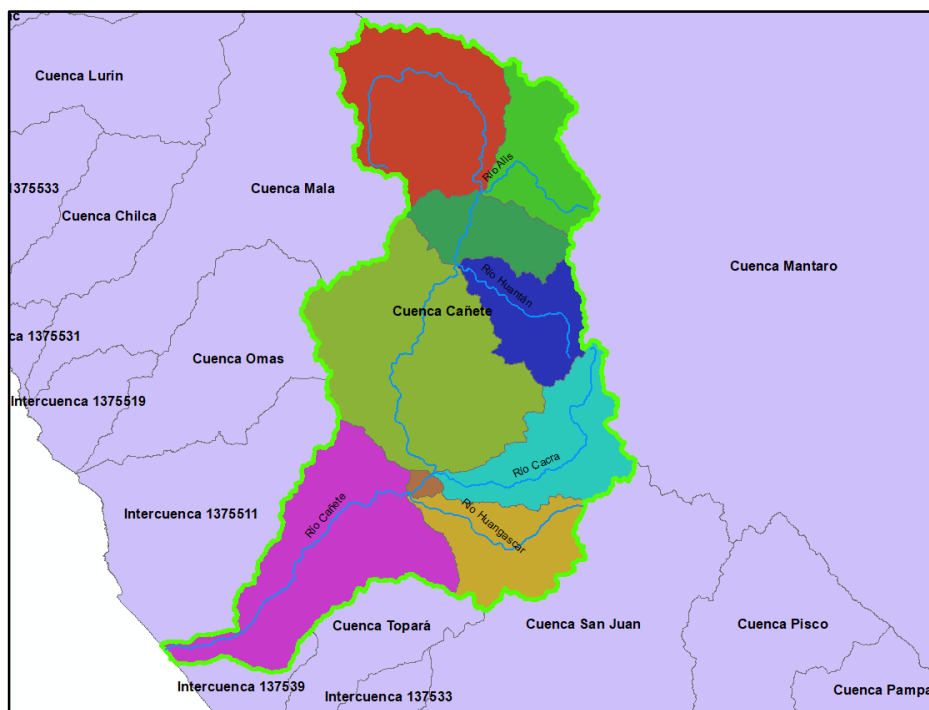


Figura 4.45: Cuenca río Cañete

- Se describen cuencas hidrográficas según niveles, tomando en cuenta particularidades geomorfológicas, clases de suelo, cobertura vegetal, vías de ingreso, poblados, entre otros aspectos.
- Se realiza análisis de registros históricos hidrométricos y climáticos aprovechables para análisis, detallando en anexos cuadros asimismo gráficos correspondientes.
- Se efectúa análisis de consistencia, que incluye un estudio gráfico de histogramas además de doble masa, así como un análisis a nivel estadístico de saltos e igualmente tendencias. Además, se complementan y extienden series por medio de métodos apropiados, como vinculación cruzada, autocorrelación y correlación múltiple.

Culminando esta primera parte, y teniendo la data de las precipitaciones regionalizadas luego de realizar el tratamiento de la información climática y la delimitación y los parámetros de las microcuencas Piticocha y Paucarcocha, se procederá primero a generar la cobertura vegetal de las unidades hidrográficas verificando los tipos y aéreas que los conforman. Luego de este proceso, se procederá a realizar el modelamiento hidrológico, en el cual se generará una serie de caudales utilizando modelo de precipitación-escorrentía llamado "Soil Moisture Method", implementado en sistema informático Water Evaluation and Planning (WEAP).

La información básica utilizada para análisis hidrológico procede de registros de estaciones meteorológicas de SENAMHI y de las Cartas Nacionales proporcionadas por IGN.

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA:

Información cartográfica fundamental para análisis incluye:

- Cartas nacionales a escala 1/100,000, generadas por IGN, además planos topográficos a escala 1/25,000, conseguidos de Ministerio de Agricultura. Para facilitar su manejo, información cartográfica fue digitalizada como parte de un SIG, utilizando software ARCGIS.
- Levantamiento topográfico de la zona, junto con un mapa de delimitación de ANA Cañete-Fortaleza, que incluye unidades hidrográficas y red hidrográfica, sin curvas de nivel, en formato KML.
- Información de modelo digital de elevación formato Raster obtenidos de la página EARTHDATA USGS, para la zona de estudio.

INFORMACIÓN METEOROLÓGICA:

Datos básicos meteorológicos utilizada en trabajo se halla referida a:

- Precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas Tanta, Vilca, Yauricocha y Carania.
- Temperatura media por mes, humedad relativa media por mes, evaporación total por mes, predominante dirección además velocidad media por mes de viento de las estaciones climatológicas Carania, Vilca, Yauyos y Cañete.
- Se posee disponibilidad de información meteorológica de estaciones vecinas a + cuenca de análisis, información climatológica además pluviométricas, con anotaciones de información administrada por SENAMHI, la adquisición de información corresponde a 6 estaciones, en la cual se posee datos de precipitación por mes en 4 de ellas, con serie de datos entre 1990–2019. De las

siguientes estaciones meteorológicas descritas en los cuadros siguiente donde se distinguen lapsos y longitudes de información disponible.

Tabla 4.27: Estaciones Meteorológicas para estudio hidrológico

Registro de Estaciones Meteorológicas empleadas en Estudio										
N°	Estación	Tipo	Coordenadas Geográficas		Altitud M.S.N.M.	Cuenca	Ubicación			Variables Climatológicas
			Latitud	Longitud			Región	Provincia	Distrito	
1	Tanta	Clim	-12.117	-76.017	4323	Cañete	Lima	Yauyos	Tanta	Pp
2	Vilca	Clim	-12.115	-75.826	3864	Cañete	Lima	Yauyos	Huancaya	Pp, T°
3	Yauricocha	Clim	-12.316	-75.723	4675	Cañete	Lima	Yauyos	Alis	Pp
4	Carania	Clim	-12.344	-75.872	3875	Cañete	Lima	Yauyos	Carania	Pp, T°
5	Yauyos	Clim	-12.492	-75.908	2327	Cañete	Lima	Yauyos	Colonia	T°, Hr, Vv Hs
6	Cañete	Clim	-13.028	-76.195	500	Cañete	Lima	Cañete	Lunahuana	Hr, Vv, Hs
7	Pacaran	Clim	-12.833	-76.067	700	Cañete	Lima	Cañete	Pacaran	Hr, Vv, Hs

GEOMORFOLOGÍA DE LAS MICROCUENCAS:

Las microcuencas analizadas están ubicadas en parte alta de unidad hidrográfica, específicamente en la zona donde se origina el río Cañete.

Una vez conseguidos parámetros geomorfológicos para área de análisis de cuencas (en puntos de interés), han permitido caracterizar de forma geomorfológica la zona, especialmente en lo correspondiente a su comportamiento frente a precipitación, considerando aspectos como avenidas o crecidas, así como otros valores necesarios para la estimación de caudales medios mensuales.

Tabla 4.28: Primordiales parámetros geomorfológicos de microcuencas

Microcuenca	Área(km ²)	Perímetro(km)	Este	Norte	Elev Media
PAUCARCOCHA	295.92844	128.95	577,411.44	1,562,755.69	4719.80
PITICOCHA	57.35516	56.28	579,794.62	1,558,654.35	4748.23

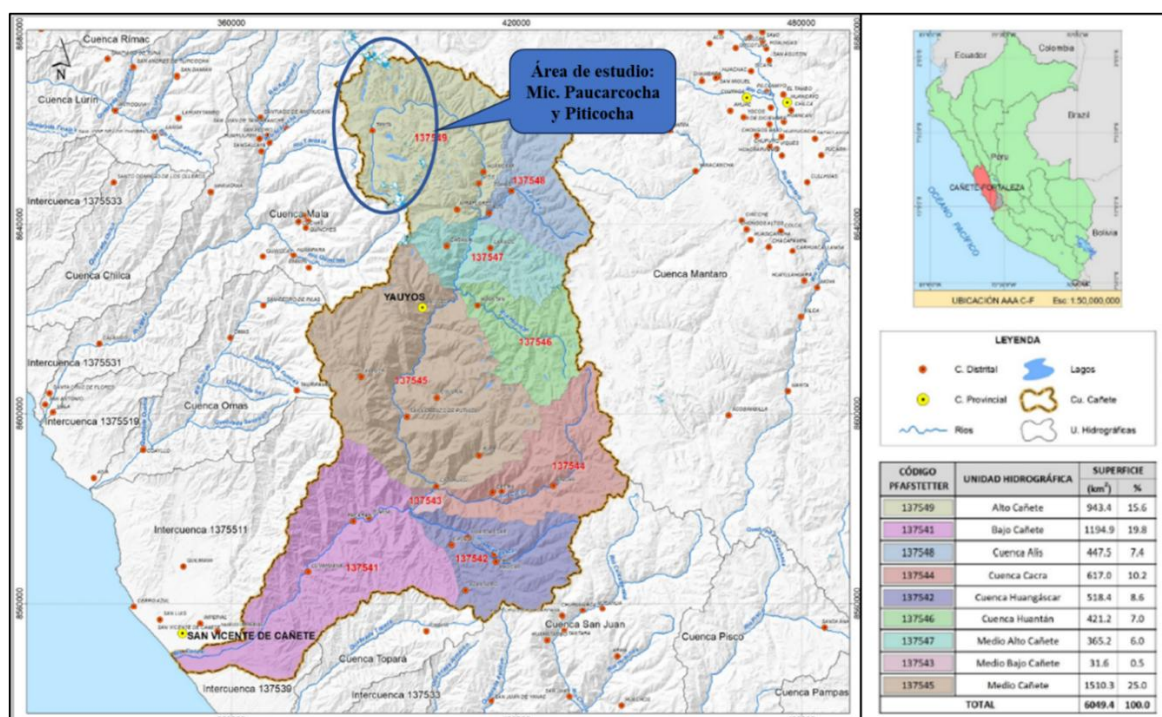


Figura 4.47: Ubicación de las microcuencas Piticocha y Paucarcocha

TRATAMIENTO DE INFORMACION PLUVIOMÉTRICA:

Desde enfoque de ingeniería hidrológica, precipitación representa primordial fuente de agua en superficie terrestre, y su medición y análisis constituyen la base para los estudios relacionados con el empleo y gestión de agua. Una zona subestimada a nivel análisis de series hidrometeorológicas es procesamiento de información histórica obtenida mediante mediciones directas, lecturas o conteos.

Tratamiento de datos implica serie de procesos destinados a conseguir información consistente, libre de discontinuidades, tendencias y probables errores sistemáticos.

Este proceso aumenta la confiabilidad del análisis hidrológico, ya que se basa en disponibilidad de información hidrométrica de calidad asimismo cantidad que permiten validar teorías relacionadas con los fenómenos naturales.

En área de oferta hídrica (cuenca), no se dispone de estaciones meteorológicas o hidrométricas, por lo que análisis hidrológico se ha efectuado utilizando disponible información de estaciones más próxima de proyecto. La localización de estaciones pluviométricas se presenta en mapa de la figura 4.48 de este estudio, donde se ilustran las estaciones utilizadas en relación con zona de análisis, determinando influencia de variables hidroclimáticas de estaciones sobre área de proyecto. Por lo tanto, análisis pluviométrico en zona de análisis se ha efectuado por medio de regionalización de precipitación (relación Precipitación-Altitud).

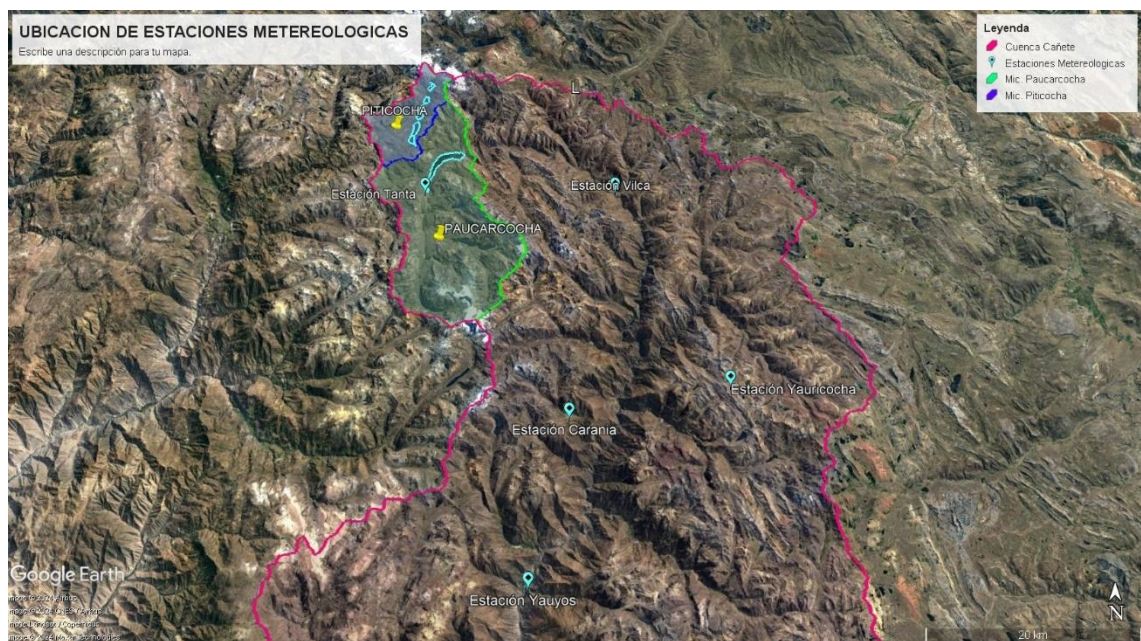


Figura 4.48: Estaciones meteorológicas de área de análisis

Información pluviométrica utilizada fue conseguida de SENAMHI. En tabla 4.28 se presenta el listado de estaciones pluviométricas ubicadas en las proximidades del área del proyecto, donde se detallan los parámetros básicos de identificación, localización y la variable medida. Estas estaciones cuentan con registros de precipitación correspondientes al período comprendido entre 1990 y 2019.

ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

Precipitación es factor fundamental que define comportamiento hidrológico de una cuenca, por lo que es esencial estudiar su variación estacional, multianual y regional. La falta de homogeneidad y consistencia en las secuencias hidrológicas constituye un elemento relevante en análisis de hidrología, ya que, si no se identifica, puede generar significativos errores en análisis posteriores, lo que lleva a resultados distorsionados altamente.

Desde un enfoque práctico, los errores sistemáticos causados por la actividad humana son de especial interés, y es en estos donde se enfoca en análisis de consistencia. Previo de utilizar información pluviométrica, es crucial evaluar comportamiento hidrológico y calidad de información. Este proceso implica efectuar análisis exploratorio de datos (AED), así como análisis de consistencia y homogeneidad, con el objetivo de eliminar valores atípicos que puedan comprometer la fiabilidad de información.

Análisis de consistencia de los datos hidrológicos se lleva a cabo mediante una serie de procedimientos específicos.

ANÁLISIS GRÁFICO DE HIDROGRAMAS:

El análisis se lleva a cabo para indicar además identificar visualmente inconsistencias en información pluviométrica, señalando los períodos en los que los datos pueden ser dudosos. Estas irregularidades pueden manifestarse como "picos" muy altos, valores muy bajos, "saltos" o "tendencias", deben verificarse para determinar si corresponden a eventos naturales que realmente ocurrieron o si son resultado de errores sistemáticos. Para ello, se utiliza hidrograma o gráfico de series de análisis en coordenadas cartesianas, donde se representa datos históricos de variable pluviométrica a nivel de año y mes. En el eje de ordenadas se ubican valores por mes o año de serie pluviométrica en unidades correspondientes, mientras que en eje de abscisas se representa lapso en años asimismo meses.

En el análisis, se han considerado siete estaciones pluviométricas para su análisis. A partir de este método, se puede concluir que no se manifiesta un lapso dudoso significativo en series por mes y año de precipitaciones totales por mes en estaciones evaluadas.

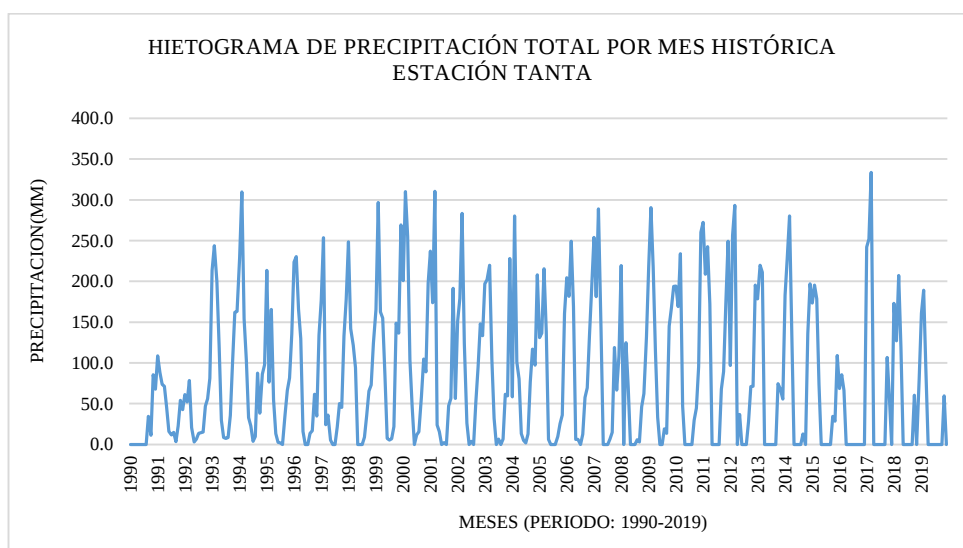


Figura 4.49: Hietograma de la estación Tanta

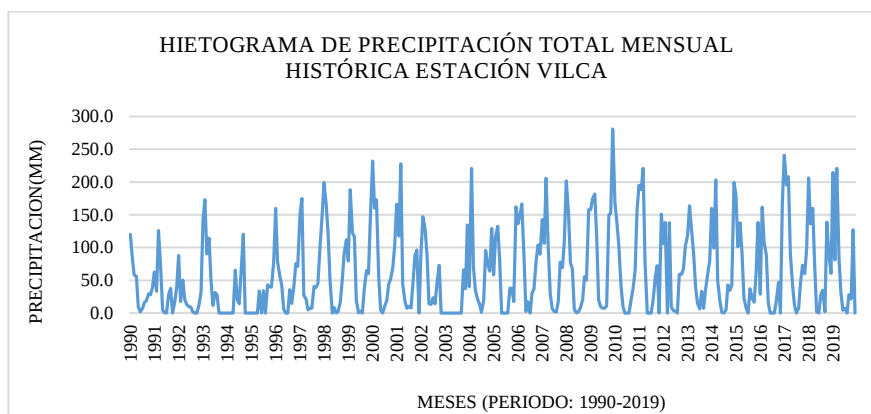


Figura 4.50: Hietograma de la estación Vilca

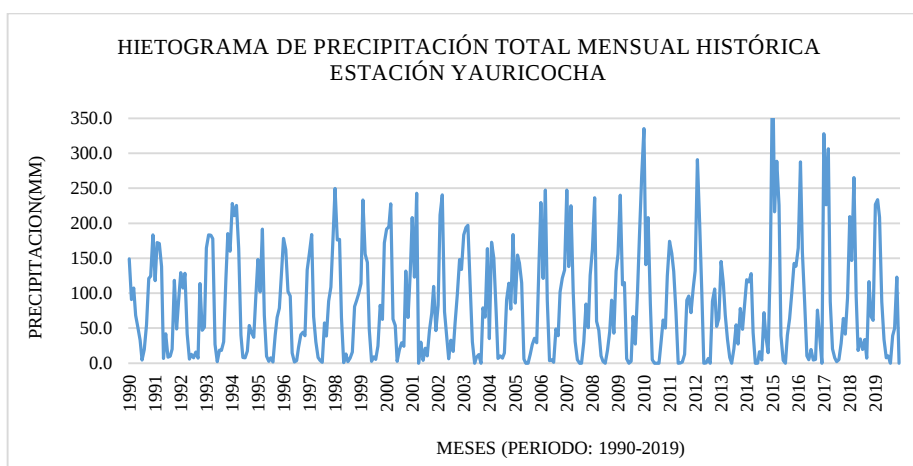


Figura 4.51: Hietograma de la estación Yauricocha

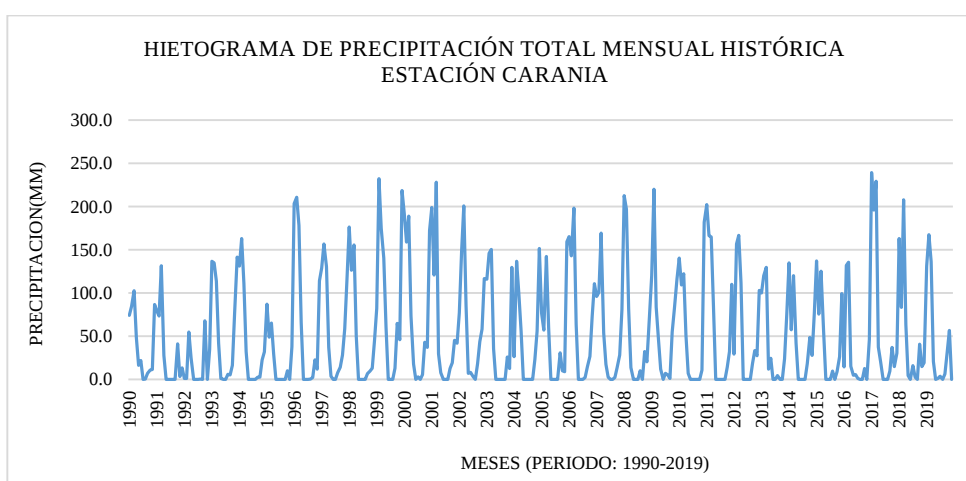


Figura 4.52: Hietograma de la estación Carania

ANÁLISIS DE DOBLE MASA:

Técnica ampliamente reconocida y empleada para detectar inconsistencias en información hidrológica múltiple (cuando se posee de 2 o más series de datos), especialmente en correspondiente a errores que podrían producirse en recopilación de los mismos. Sin embargo, este método no se emplea para realizar correcciones basadas en curva de doble masa. Los probables errores se identifican a través de los quiebres que detalla recta de doble masa; se indica que registro de información tiene inferiores sistemáticos errores cuando se observa una inferior cantidad de puntos de quiebre.

En análisis de curva de doble masa de estaciones evaluadas, examinaron hallazgos gráficos, seleccionando estación Carania como estación base debido a su regularidad mayor en la serie y su registro más extenso en cotejo con las demás. Estación Carania se graficó en eje de abscisas, mientras que otras estaciones se ubicaron en eje de ordenadas, generando tantas rectas como estaciones se analizaron. En los gráficos, identificaron quiebres que podrían ser significativos para un posterior estadístico análisis.

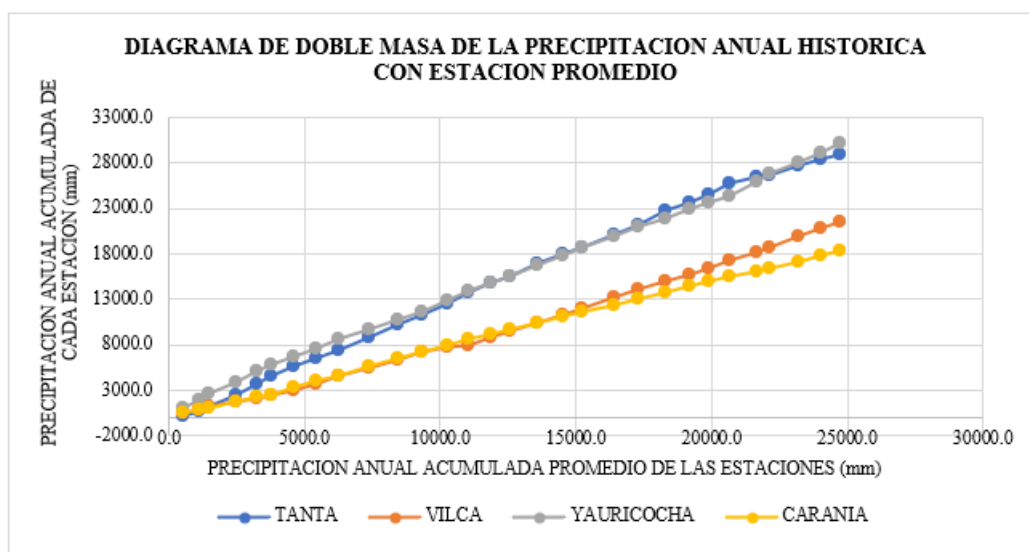


Figura 4.53: Diagrama doble masa precipitación por año con estación promedio

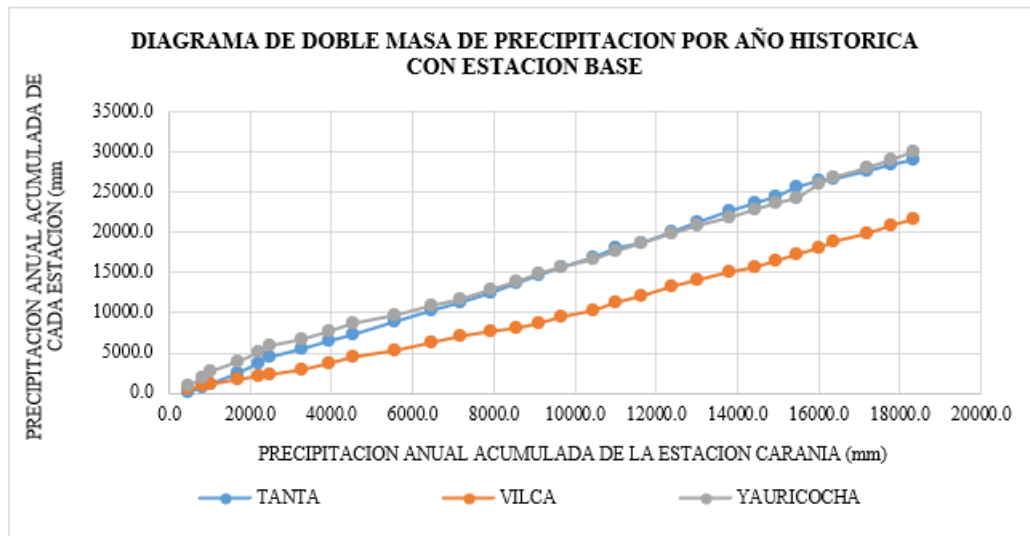


Figura 4.54: Diagrama doble masa de precipitación por año con estación base

ANÁLISIS ESTADÍSTICO:

a) Análisis de Saltos:

Consistencia en media se evalúa por medio de prueba estadística "T" de Student, mientras que para desviación estándar se utiliza prueba "F" de Fisher. Si parámetros de media igualmente desviación estándar de lapsos analizados son iguales a nivel estadístico, no se requiere corrección; de lo contrario, se ajustará la información. Tras este análisis, se confirma que la serie de datos es homogénea, confiable asimismo consistente con un 95% de probabilidad.

En esa situación, análisis por mes revela que series de precipitación de estaciones analizadas no presentan significativos "Saltos" en parámetros evaluados (media asimismo desviación estándar) en ninguna de estación, por lo que no se requiere corrección.

b) Análisis de Tendencia:

Poster de analizados saltos en media asimismo desviación estándar de datos pluviométrico, se valoró tendencias en 2 parámetros determinísticos. Para determinar si tendencia es significativa, se estudia coeficiente de correlación "R" por medio de prueba "T" de Student. Normalmente, las tendencias en desviación suelen aparecer en datos por semana o mes, pero no en datos por año.

En esta situación, análisis por mes detalla que series de precipitación de estaciones consideradas no manifiestan significativas "Tendencias" en parámetros estudiados (media asimismo desviación estándar) en ninguna de estación. Por lo tanto, no se realizan correcciones en dicha información.

Tabla 4.29: Análisis de Saltos de Precipitaciones por mes

Análisis Consistencia De Información Pluviométrica (Análisis De Saltos)												
Análisis Estadístico En Saltos De Información Histórica De Precipitación Total Mensual												
Estación	Periodo De Análisis	Numero De Datos Promedio Y Desviación Estándar			Consistencia De La Media				Consistencia De La Desviacion Estándar			
		N° Datos	Prom	Desv Est	T Cal Tc	T Tab (95%) Tt	Comparación	Dif Significativa	F Cal Fc	F Tab (95%) Ft	Comparación	Dif Significativa
Tanta	Ene 1990 - Dic 2019	160	85.43	83.20	0.38	1.97	[Tc]<Tt	No	1.20	1.29	[Fc]<Ft	No
	Ene 1990 - Dic 2019	187	81.87	91.24								
Vilca	Ene 1990 - Dic 2019	220	63.70	59.67	1.33	1.97	[Tc]<Tt	No	1.29	1.31	[Fc]<Ft	No
	Ene 1990 - Dic 2019	103	73.62	67.77								
Yauricocha	Ene 1990 - Dic 2019	60	83.57	67.69	0.14	1.97	[Tc]<Tt	No	1.39	1.43	[Fc]<Ft	No
	Ene 1990 - Dic 2019	295	85.09	79.87								
Carania	Ene 1990 - Dic 2019	180	50.57	62.54	0.16	1.97	[Tc]<Tt	No	1.02	1.28	[Fc]<Ft	No
	Ene 1990 - Dic 2019	179	51.65	63.11								

Tras evaluar los datos mediante 3 metodologías, se concluye que datos pluviométricos de caudales medios además precipitaciones por mes utilizada en este

análisis está libre de tendencias asimismo saltos, siendo una serie homogénea, confiable además consistente con un 95% de posibilidad. Esto permite completación, extensión de registros y aplicación para diversos fines.

COMPLETACIÓN DE INFORMACIÓN:

Proceso de completación asimismo extensión de datos pluviométricos total por mes se llevó a cabo utilizando software HEC4, integrado como módulo de programa de cómputo "SIH". El HEC4 efectúa vinculación múltiple cruzada entre información de precipitación por mes de totalidad de estaciones, identificando coeficiente de correlación más apropiado.

A continuación, se presentan registros completos de estaciones seleccionadas para la precipitación total por mes:

Tabla 4.30: Completación de precipitación total mensual (mm) de Tanta

WGS 84 Geográficas	Estación	Tanta											
	Variable	Precipitación Acumulada 1 Mes (mm)											
	Operador	Estudio											
	WGS 84 Geográficas	Latitud: -12.116667 / Longitud: -76.016667 / Altitud(msnm): 4323											
	Tipo	Convencional / Climática											
Ámbito Político	Dpto: Lima / Prov: Yauyos / Dist.: Tanta												
	AAA: Cañete Fortaleza / ALA: Mala Omas Cañete												
Unidad Hidrográfica	Cuenca Cañete												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	184.6	211.9	218.6	103.9	14.2	1.3	0.8	5.6	34.6	11.3	85.6	67.7	940.1
1991	108.7	88.3	73.7	71.4	45.6	16.1	11.7	14.7	3.4	22.6	53.9	42.8	552.9
1992	61.2	52.3	78.5	20.6	3.1	6.7	13.6	14.6	15.1	47.1	56.2	81.0	450.0
1993	213.4	243.7	199.6	120.7	29.6	8.5	7.5	8.5	35.7	101.4	162.2	163.2	1294.0
1994	228.7	309.9	154.4	103.4	33.0	22.7	3.9	9.6	87.6	38.4	86.3	97.6	1175.5
1995	213.4	76.5	165.7	54.9	13.4	2.6	1.7	0.0	36.8	66.1	81.4	135.6	848.1
1996	223.8	230.5	166.0	129.8	16.1	0.0	0.0	13.8	16.6	61.4	34.8	134.1	1026.9
1997	177.1	253.6	24.4	36.1	5.4	0.0	0.0	21.4	50.2	45.6	133.1	178.0	924.9
1998	248.4	142.1	121.8	94.2	0.0	0.0	0.0	9.0	35.5	65.3	72.9	124.3	913.5
1999	165.5	296.8	162.6	155.0	84.6	7.3	5.5	7.0	21.9	148.8	136.6	269.3	1460.9
2000	201.1	310.2	254.9	103.8	46.5	0.0	11.8	15.7	58.8	104.9	89.2	197.7	1394.6
2001	237.2	173.7	310.5	23.8	15.7	0.0	2.4	0.0	47.4	56.6	191.6	56.6	1115.5
2002	150.7	178.8	283.6	123.9	26.1	0.0	3.9	0.0	52.3	94.9	147.8	133.3	1195.3
2003	197.0	202.3	219.8	104.7	32.1	0.0	6.6	0.0	6.6	61.4	59.4	228.1	1118.0
2004	58.3	280.3	101.1	80.5	13.2	5.0	1.8	12.9	76.5	116.9	97.3	208.1	1051.9
2005	131.0	136.4	215.3	138.5	6.1	0.0	0.0	0.0	9.6	25.5	35.9	160.6	858.9
2006	204.4	181.9	249.1	169.3	6.3	6.3	0.0	12.4	57.8	69.5	133.7	193.1	1283.8
2007	254.0	181.3	288.8	142.4	10.6	1.3	0.0	6.4	14.8	118.7	66.5	108.1	1192.9
2008	219.4	213.8	124.7	70.1	0.0	0.0	0.0	5.6	3.0	46.4	62.5	131.7	877.2
2009	218.1	290.4	217.4	114.4	33.3	0.0	0.0	19.0	13.8	145.2	167.6	193.8	1413.0
2010	194.2	169.1	234.1	47.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.7	44.7	95.3	260.4	1074.5
2011	272.6	208.9	242.7	172.2	0.0	0.0	0.0	0.0	67.9	89.4	173.3	249.3	1476.3
2012	96.8	256.4	293.3	0.0	36.7	0.0	0.0	0.0	28.5	71.0	71.3	195.3	1049.3
2013	178.4	219.8	211.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.4	68.3	55.7	807.9
2014	183.0	230.0	280.2	137.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.8	0.0	135.6	197.2	1175.8
2015	173.6	195.6	178.5	73.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	28.5	109.1	793.5
2016	68.5	85.6	66.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	192.9	413.1
2017	242.0	251.9	333.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	106.9	57.0	0.0	991.6
2018	173.2	127.0	207.1	119.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.4	0.0	80.4	767.5
2019	160.9	189.2	90.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.6	175.6	676.1
Nº Registro	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Pormedio	181.31	199.61	192.28	83.69	15.72	2.59	2.37	5.87	27.23	64.31	88.11	147.35	
Maximo	272.60	310.20	333.80	172.20	84.60	22.70	13.60	21.40	87.60	148.80	191.60	269.30	
Minimo	58.30	52.30	24.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Tabla 4.31: Completación de precipitación total mensual (mm) de Vilca

WGS 84 Geográficas	Estación	Vilca											
	Variable	Precipitación Acumulada 1 Mes (mm)											
	Operador	Estudio											
	Tipo	Convencional / Climática											
	Ámbito Político	Dpto: Lima / Prov: Yauyos / Dist.: Huancaya											
mbito Administrativo	AAA: Cañete Fortaleza / ALA: Mala Omas Cañete												
Unidad Hidrográfica	Cuenca Cañete												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	120.0	86.2	58.2	56.1	9.6	2.3	7.2	16.1	18.7	29.6	28.2	38.9	471.1
1991	62.8	33.6	126.2	76.6	4.5	0.8	0.0	28.8	37.8	0.0	17.6	40.3	429.0
1992	88.0	18.0	50.7	21.2	13.5	9.9	9.4	2.0	0.0	0.4	11.4	31.9	256.4
1993	141.5	173.0	90.6	114.2	50.7	11.7	31.5	28.2	45.9	68.9	65.2	122.9	944.3
1994	124.0	145.4	157.6	70.5	65.7	21.1	14.3	70.6	120.4	72.5	70.2	152.6	1084.7
1995	119.6	144.2	143.8	72.2	34.0	0.0	34.5	0.0	43.3	40.0	39.7	79.2	750.6
1996	160.0	78.4	56.6	43.2	6.7	0.3	0.0	35.7	14.8	40.5	75.8	71.5	583.5
1997	149.5	175.0	27.1	21.9	4.9	7.7	7.3	40.8	39.1	45.3	104.0	147.2	769.8
1998	199.1	165.0	119.6	50.0	0.0	8.6	0.0	2.5	16.7	49.9	90.3	111.9	813.6
1999	79.8	188.0	122.1	116.8	19.6	0.6	3.1	0.0	37.5	64.9	60.0	146.0	838.4
2000	232.2	160.2	173.0	55.3	4.4	0.0	11.6	18.7	43.4	51.8	69.4	103.8	923.8
2001	166.1	118.0	227.8	44.8	18.3	7.3	10.6	8.2	46.0	87.1	96.2	154.7	985.1
2002	92.0	146.9	127.8	87.8	14.4	13.4	23.5	14.2	50.0	73.0	62.8	130.6	836.4
2003	118.5	152.3	137.2	82.4	15.5	10.5	7.3	13.6	38.6	65.9	37.3	134.5	813.6
2004	40.2	220.9	69.8	34.8	21.0	13.9	1.2	19.5	95.7	76.0	64.1	128.9	786.0
2005	58.5	116.7	132.5	80.2	14.9	8.6	3.4	11.6	38.5	37.9	17.8	162.2	682.7
2006	136.3	148.6	166.5	84.1	2.8	17.4	2.8	30.7	37.0	81.4	104.3	89.9	901.8
2007	142.5	106.6	205.7	106.4	29.0	7.0	2.5	1.7	18.2	77.8	69.4	110.5	877.3
2008	201.9	151.9	76.6	67.5	5.4	0.9	2.0	7.9	20.3	56.0	50.4	157.7	798.5
2009	158.0	174.6	181.5	116.0	20.1	10.2	7.5	7.5	10.8	149.5	152.7	280.7	1269.1
2010	167.7	139.0	104.3	41.2	10.5	0.0	0.0	0.0	19.0	35.1	65.2	156.3	738.3
2011	195.0	188.4	220.9	77.8	14.8	0.0	3.4	18.6	54.7	72.2	74.8	151.0	1071.7
2012	106.2	138.1	0.0	137.7	9.6	3.5	2.9	0.0	59.0	59.3	67.5	102.3	686.1
2013	118.8	163.6	129.1	89.4	39.4	14.9	6.4	33.6	7.6	35.5	60.7	79.4	778.4
2014	159.9	99.4	203.3	48.8	18.0	1.0	0.0	5.3	42.9	35.0	42.7	199.5	855.8
2015	180.3	101.0	138.0	91.3	22.9	7.4	0.0	37.4	22.4	16.6	62.2	138.2	817.7
2016	28.8	161.5	108.1	88.7	16.4	0.0	0.0	0.0	18.2	47.0	0.0	168.8	637.5
2017	240.9	195.2	208.2	91.2	42.1	11.6	0.0	8.1	47.7	72.8	60.1	99.6	1077.5
2018	206.3	136.1	159.7	72.2	2.0	0.2	27.8	35.0	2.2	138.6	91.4	60.7	932.2
2019	214.2	81.1	220.8	83.2	31.0	4.4	7.6	0.0	27.8	21.5	127.2	141.0	959.8
N° Registro	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Pormedio	140.29	136.90	131.44	74.12	18.72	6.50	7.60	16.54	35.81	56.73	64.62	123.09	
Maximo	240.90	220.90	227.80	137.70	65.70	21.10	34.50	70.60	120.40	149.50	152.70	280.70	
Minimo	28.80	18.00	0.00	21.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.90	

Tabla 4.32: Completación de precipitación total mensual (mm) de Yauricocha

Estación	Yauricocha												
Variable	Precipitación Acumulada 1 Mes (mm)												
Operador	Estudio												
WGS 84 Geográficas	Latitud: -12.316472 / Longitud: -75.722639 / Altitud(msnm): 4675												
Tipo	Convencional / Climática												
Ámbito Político	Dpto: Lima / Prov: Yauyos / Dist.: Alis												
Ámbito Administrativo	AAA: Cañete Fortaleza / ALA: Mala Omas Cañete												
Unidad Hidrográfica	Cuenca Cañete												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	148.9	90.9	107.3	68.6	51.1	32.7	4.5	19.4	54.7	121.0	124.2	183.4	1006.7
1991	117.9	172.4	171.1	138.0	6.5	41.8	8.4	9.7	20.2	118.3	48.9	87.5	940.7
1992	129.3	107.6	128.3	42.1	5.8	12.6	7.5	15.9	7.3	113.8	46.8	51.7	668.7
1993	164.5	183.3	183.0	177.9	26.8	2.1	18.7	18.1	30.7	120.7	185.3	159.9	1271.0
1994	228.2	210.7	225.6	163.6	40.0	8.3	7.4	17.4	54.0	44.0	36.9	91.1	1127.2
1995	148.2	101.8	191.8	68.7	9.8	2.8	7.8	1.9	40.3	65.2	78.4	131.1	847.8
1996	178.3	162.2	102.2	96.1	14.3	1.8	3.3	22.8	40.6	44.1	39.2	133.5	838.4
1997	157.9	183.8	66.8	30.4	8.2	4.0	1.0	57.5	38.7	88.6	108.6	182.8	928.3
1998	249.8	176.1	177.0	65.3	0.7	12.9	2.0	7.1	15.9	80.9	88.9	99.8	976.4
1999	113.7	233.4	156.1	143.8	47.3	2.6	8.8	5.4	24.7	82.5	62.4	172.0	1052.7
2000	191.7	194.9	227.6	63.1	53.8	2.7	19.2	29.1	23.9	131.7	65.4	129.6	1132.7
2001	208.1	123.0	242.7	90.6	30.0	4.1	21.4	10.2	47.1	71.4	109.7	46.5	1004.8
2002	82.7	211.7	240.5	73.5	36.9	6.1	32.8	16.8	57.4	98.3	148.0	134.0	1138.7
2003	183.2	193.9	197.3	111.8	30.6	0.0	8.6	12.2	43.4	78.8	65.9	163.8	1089.5
2004	34.9	172.7	150.0	76.1	6.7	10.2	7.2	14.7	90.7	114.4	77.3	184.0	938.9
2005	86.1	154.3	143.3	114.8	5.9	0.0	0.0	13.3	26.3	35.4	29.0	139.8	748.2
2006	229.7	121.0	247.6	90.0	3.6	4.7	1.1	49.0	39.3	102.1	121.6	133.0	1142.7
2007	247.6	138.2	225.0	102.1	31.1	5.1	0.0	0.0	30.1	84.7	50.8	125.8	1040.5
2008	162.7	236.6	60.0	47.2	10.3	2.7	0.0	18.0	44.9	89.9	43.0	131.7	847.0
2009	155.7	240.0	111.9	115.1	6.3	0.0	2.4	66.8	27.3	103.4	182.4	267.9	1279.2
2010	335.5	141.0	208.1	85.1	4.8	0.0	0.0	0.0	27.6	61.5	50.1	124.7	1038.4
2011	174.0	157.0	131.4	73.2	16.6	0.3	1.8	12.5	90.2	95.8	72.2	107.6	932.6
2012	132.3	291.0	200.7	97.7	0.0	0.3	6.9	0.0	88.8	105.8	52.5	64.1	1040.1
2013	145.2	114.4	68.9	33.9	8.1	0.0	20.6	54.7	27.2	78.3	48.3	81.2	680.8
2014	119.3	116.3	127.9	43.7	0.0	0.0	16.5	4.2	72.1	37.8	15.1	148.5	701.4
2015	431.5	216.2	288.6	225.7	39.0	4.1	0.0	39.8	63.3	100.9	142.8	138.7	1690.6
2016	164.4	287.9	158.3	87.3	10.5	5.0	19.3	4.4	5.5	76.0	37.7	145.1	1001.4
2017	327.9	226.4	306.6	88.0	20.3	7.4	2.2	5.0	28.4	63.8	41.6	93.0	1210.6
2018	209.6	146.8	265.3	95.5	18.0	34.6	19.3	33.7	7.3	116.5	66.0	61.3	1073.9
2019	227.0	233.7	208.7	87.5	33.9	7.5	10.4	0.0	39.2	49.8	123.1	151.2	1172.0
N° Registro	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Pormedio	182.86	177.97	177.32	93.21	19.23	7.21	8.64	18.65	40.24	85.85	78.74	128.81	
Maximo	431.50	291.00	306.60	225.70	53.80	41.80	32.80	66.80	90.70	131.70	185.30	267.90	
Minimo	34.90	90.90	60.00	30.40	0.00	0.00	0.00	0.00	5.50	35.40	15.10	46.50	

WGS 84 Geográficas	Estación	Carania											
	Variable	Precipitación Acumulada 1 Mes (mm)											
	Operador	Estudio											
	Tipo	Convencional / Climática											
	Ámbito Político	Dpto: Lima / Prov: Yauyos / Dist.: Carania											
mbito Administrativo	AAA: Cañete Fortaleza / ALA: Mala Omas Cañete												
Unidad Hidrográfica	Cuenca Cañete												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	74.3	84.6	102.7	48.7	16.5	21.9	0.0	0.4	6.9	10.8	11.6	86.7	465.1
1991	79.4	73.5	131.4	27.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0	3.3	13.2	369.5
1992	1.3	1.2	54.7	24.7	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	67.7	0.0	34.8	184.7
1993	136.8	134.7	113.8	41.8	1.1	0.0	0.0	6.0	5.2	16.3	76.6	141.4	673.7
1994	131.3	163.2	111.3	32.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	2.7	22.8	32.0	498.2
1995	86.9	49.1	65.2	29.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2	0.0	37.9	278.7
1996	203.4	210.9	178.3	65.6	0.0	0.0	0.0	0.4	2.1	22.7	11.9	114.3	809.6
1997	128.9	156.8	130.5	37.1	3.6	0.0	0.0	7.9	14.1	28.0	58.6	115.5	681.0
1998	176.2	126.3	155.5	50.4	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	9.5	13.1	45.0	582.6
1999	82.2	232.3	175.0	140.6	60.6	0.0	0.0	0.0	12.9	64.9	45.8	218.7	1033.0
2000	191.8	158.8	189.1	73.5	17.8	0.0	3.1	0.0	5.7	43.1	36.9	172.3	892.1
2001	198.8	120.7	228.2	29.7	7.9	0.0	0.0	0.0	12.6	19.3	45.4	41.9	704.5
2002	77.2	147.2	200.8	85.7	7.0	8.2	3.4	0.0	18.0	43.7	58.2	116.8	766.2
2003	115.8	146.0	150.5	35.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.1	12.5	129.5	616.1
2004	26.4	136.7	98.9	56.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.1	55.8	151.4	548.4
2005	76.7	57.1	142.2	60.1	0.0	0.0	0.0	0.0	30.6	10.1	8.8	159.2	544.8
2006	165.3	143.0	198.3	63.7	0.0	0.0	0.0	2.3	14.5	26.8	72.5	110.8	797.2
2007	95.9	100.9	169.2	53.9	17.6	2.6	0.0	0.0	2.2	13.8	28.1	80.9	565.1
2008	212.6	197.1	81.5	13.8	0.0	0.0	0.0	10.1	0.0	32.2	20.4	73.0	640.7
2009	119.9	220.1	83.8	47.1	11.8	0.0	7.2	5.2	1.3	54.8	82.3	116.2	749.7
2010	140.3	109.2	122.1	51.1	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	182.1	622.7
2011	202.4	166.5	164.7	84.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	32.3	110.0	774.0
2012	29.3	156.6	166.6	111.4	0.0	0.0	0.0	0.0	18.5	33.4	27.4	102.9	646.1
2013	100.1	120.1	129.7	11.8	24.5	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	23.9	75.5	490.1
2014	134.9	57.3	120.2	41.9	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1	48.6	27.9	76.4	525.3
2015	137.1	75.6	125.1	56.1	0.0	0.0	0.0	9.6	0.0	9.1	26.5	99.2	538.3
2016	14.3	131.9	135.6	15.1	4.7	5.5	1.2	0.0	0.0	12.5	0.0	46.5	367.3
2017	239.3	195.9	229.4	37.5	20.8	0.0	0.0	0.0	9.7	36.9	14.7	30.3	814.5
2018	163.1	83.4	207.9	63.4	4.3	0.0	15.9	2.6	0.0	40.8	14.8	19.3	615.5
2019	131.1	167.6	136.2	20.6	0.0	1.1	3.6	0.0	6.2	31.2	56.6	121.6	675.8
Nº Registro	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Pormedio	122.43	130.81	143.28	50.35	6.84	1.31	1.15	1.64	6.26	26.45	29.99	95.18	
Maximo	239.30	232.30	229.40	140.60	60.60	21.90	15.90	10.10	30.60	67.70	82.30	218.70	
Minimo	1.30	1.20	54.70	11.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.20	

PRECIPITACIÓN PROMEDIO SOBRE CADA MICROCUENCA:

Calcular precipitación areal media de cuenca partiendo de registros históricos es fundamental para cuantificación de disponibilidad hídrica de zona. En esta investigación, se indicó precipitación real media de las microcuencas Piticocha y Paucarcocha, tanto a nivel por año como mensual, utilizando método de regionalización de precipitación. Este método se basó en información de precipitación de estaciones que influyen en la zona de análisis, después de realizar un análisis completación, exploratorio, extensión de información y un análisis estadístico de los mismos.

Precipitación representativa de cuenca hidrográfica se conoce como precipitación areal, y se manifiestan diversas metodologías para su cálculo. Conforme con particularidades de cuenca en análisis, se eligió método de regionalización de precipitación, ya que ofrece óptima aproximación además representatividad al incorporar efecto espacial en cuenca. Este comportamiento se debe a fuerte correlación observada entre precipitación y la altitud.

Regionalización consiste en agrupar estaciones con un comportamiento climático similar, seleccionadas mediante la evaluación de prueba de Pearson, donde los resultados mejores son los que se acercan a la unidad ($r=1$).

Tabla 4.34: Precipitación total anual (mm) Regionalizada

NOMBRE ESTACION	ALTITUD MEDIA mnm	PRECIPITACION MEDIA ANUAL mm	EQUACION DE REGRESION $P^2 = B_0 + B_1 * H$				PRECIPITACION CORREGIDA mm
			X^2	Y^2	$X*Y^2$	Y^4	
TANTA	4,323.00	1,010.45	1.87E+07	1.02E+06	4.41E+09	1.04E+12	938.45
VILCA	3,574.00	812.35	1.28E+07	6.60E+05	2.36E+09	4.35E+11	709.93
YAUICOCHA	4,675.00	1,018.73	2.19E+07	1.04E+06	4.85E+09	1.08E+12	1,028.46
CARANIA	3,875.00	615.68	1.50E+07	3.79E+05	1.47E+09	1.44E+11	809.56
SUMA	16,447.00	3,457.22	6.83E+07	3.10E+06	1.31E+10	2.70E+12	3,49E+03
n	4	4	4	4	4	4	4
PROMEDIO	4,111.75	864.31	1.71E+07	7.74E+05	3.27E+09	6.75E+11	871.60
FORMULAS PARA EL CALCULO DE PARAMETROS DE REGRESION				VALORES DE PARAMETROS DE REGRESION			
A= SUM X	1.64E+04	G = C-(A^2)/n	7.07E+05	COEF. INDEPENDIENTE	Bo =	-1293471.66	
B= SUM Y	3.46E+03	H = F-A*D/n	3.56E+08	COEF. DEPENDIENTE	B1 =	502.93	
C= SUM X^2	6.83E+07	I = F-(D^2)/n	3.00E+11	COEF. DE CORRELACION	r =	0.773	
D= SUM Y^2	3.10E+06	J = H/G	5.03E+02				
E= SUM X*Y	11.31E+10	K = (D-J*A)/n	-1.29E+06				
F= SUM Y^4	2.70E+12						
FORMULAS DE PARAMETROS DE REGRESION				PRECIP. MEDIA ANUAL PROYECTO (APROX.)			
COEF. INDEPENDIENTE	Bo= (D-J*A)/n			MICRO PAUCARCOCHA	4,719.80 mnm =	1,039.36	
COEF. DEPENDIENTE	B1= H/G			MICRO PITICOCHA	4,748.23 mnm =	1,046.21	
COEF. DE CORRELACION	r = H/SQRT(G*I)						
DESVIACION ESTANDAR	S = (D-A^2/n)-(K*(A*D-A*B)/n)						

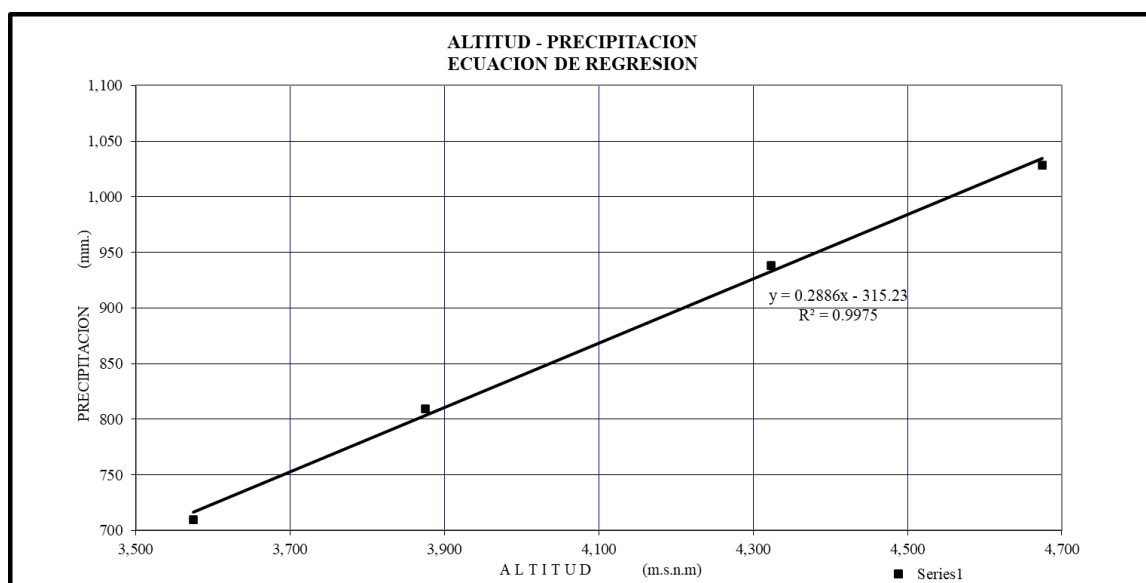


Figura 4.55: Correlación Altitud-Precipitación de estaciones seleccionadas

En correspondientes tablas se muestran la precipitación total por mes (mm) regionalizada para las microcuencas de las lagunas.

Tabla 4.35: Precipitación total mensual (mm) regionalizada – Piticocha

REGISTRO HIDROMETEOROLOGICO GENERADO Precipitación Mensual Acumulada (mm) MICRO PITICOCHA															
ESTACION : MICRO PITICOCHA				LAT: -12.036				Departamento : LIMA				Provincia : YAUYOS			
				LONG: -76.037				Distrito : TANTA							
				ALT: 4,748 msnm											
ITEM	ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1	1990	155.53	140.15	145.14	82.75	27.47	19.35	3.71	11.92	32.17	49.61	68.47	115.96	852.2	71.0
2	1991	112.66	110.62	161.17	91.10	14.29	15.50	5.12	15.37	18.33	55.25	33.39	52.65	685.4	57.1
3	1992	78.49	48.13	93.61	33.83	6.62	8.20	8.33	8.63	5.65	71.64	29.99	58.90	452.0	37.7
4	1993	200.59	222.17	176.11	131.96	31.08	6.36	16.92	18.54	33.87	86.33	143.48	183.19	1250.6	104.2
5	1994	213.62	249.23	196.89	105.82	39.78	14.49	7.50	29.52	75.44	45.49	63.17	110.81	1151.8	96.0
6	1995	167.68	113.29	166.21	67.65	16.74	1.39	13.51	0.51	33.66	50.89	53.69	110.09	795.3	66.3
7	1996	241.49	216.02	163.06	99.69	9.93	0.58	0.89	21.07	20.66	49.58	48.35	140.90	1012.2	84.4
8	1997	189.10	234.89	88.98	40.00	6.65	3.53	2.59	37.18	41.23	61.60	120.21	189.55	1015.5	84.6
9	1998	267.55	189.32	182.77	78.29	0.19	6.23	0.54	4.91	21.11	57.79	76.22	112.33	997.3	83.1
10	1999	131.96	295.57	196.26	174.54	65.80	2.67	4.71	3.17	29.52	107.24	89.02	253.00	1353.5	112.8
11	2000	257.56	247.83	260.38	91.68	34.98	0.73	13.10	17.66	37.06	96.30	77.44	190.63	1325.4	110.4
12	2001	252.78	165.25	312.32	57.42	21.18	3.43	9.76	5.37	44.38	69.17	126.57	93.67	1161.3	96.8
13	2002	121.69	211.16	261.53	115.00	23.95	9.46	18.78	9.07	51.96	91.82	121.18	160.73	1196.3	99.7
14	2003	185.27	213.26	215.57	97.41	21.02	3.33	6.27	7.63	25.66	68.53	49.58	198.60	1092.1	91.0
15	2004	47.83	244.32	130.15	75.50	11.71	8.40	2.77	13.33	73.65	93.61	89.11	206.87	997.2	83.1
16	2005	106.94	136.79	194.77	116.28	7.82	2.72	1.09	7.28	34.92	32.22	26.06	197.29	864.2	72.0
17	2006	226.70	186.07	266.29	119.85	3.40	8.34	1.18	27.06	42.75	82.05	129.97	159.47	1253.1	104.4
18	2007	215.65	159.05	269.75	119.45	27.84	5.04	0.80	2.10	18.50	82.56	64.16	130.48	1095.4	91.3
19	2008	253.49	249.56	106.16	57.29	4.51	1.02	0.64	13.11	19.35	67.37	51.71	149.43	973.6	81.1
20	2009	197.30	286.27	177.17	116.27	21.30	3.25	6.14	27.35	14.75	134.59	174.33	259.23	1418.0	118.2
21	2010	252.09	170.73	199.26	69.66	7.66	0.00	0.00	0.00	20.75	38.71	62.23	225.50	1046.6	87.2
22	2011	262.91	225.20	236.06	122.76	9.22	0.08	1.58	9.31	58.37	76.78	99.51	185.37	1287.1	107.3
23	2012	105.85	252.79	197.68	118.37	11.99	1.20	2.79	0.00	57.76	79.23	64.89	141.87	1034.4	86.2
24	2013	163.77	188.40	167.16	42.73	25.31	4.74	7.62	27.45	9.79	50.62	59.34	93.41	840.3	70.0
25	2014	185.97	143.86	219.43	78.80	5.73	0.32	4.47	2.82	44.11	42.35	62.73	184.70	975.3	81.3
26	2015	275.71	170.96	219.55	132.35	17.85	3.47	0.00	26.83	24.28	44.95	76.86	150.93	1143.7	95.3
27	2016	76.55	207.16	151.90	58.40	10.09	3.73	5.75	1.19	7.28	40.94	10.21	160.05	733.2	61.1
28	2017	327.68	269.32	329.58	69.05	27.87	5.70	0.60	3.93	27.06	82.40	50.62	69.97	1263.8	105.3
29	2018	234.99	149.99	262.84	105.28	7.37	9.44	20.94	21.39	2.68	107.98	53.35	63.83	1040.1	86.7
30	2019	225.41	207.51	207.69	59.07	19.05	3.91	6.79	0.00	22.14	33.80	112.77	181.06	1079.2	89.9
Nro.DATOS		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
MEDIA		191.16	196.83	198.51	90.94	17.95	5.22	5.83	12.46	31.63	68.38	76.29	151.02	1046.21	87.18
DESV.STD		67.96	55.63	58.18	32.05	13.37	4.69	5.65	10.46	18.26	24.55	37.20	54.25	211.12	17.59
C.V.		0.36	0.28	0.29	0.35	0.75	0.90	0.97	0.84	0.58	0.36	0.49	0.36	0.20	0.20
P.MAXIMA		327.68	295.57	329.58	174.54	65.80	19.35	20.94	37.18	75.44	134.59	174.33	259.23	1417.96	118.16
P.MINIMA		47.83	48.13	88.98	33.83	0.19	0.00	0.00	0.00	2.68	32.22	10.21	52.65	452.02	37.67

Tabla 4.36: Precipitación total mensual (mm) regionalizada – Paucarcocha

REGISTRO HIDROMETEOROLOGICO GENERADO															
Precipitación Mensual Acumulada (mm)															
MICRO PAUCARCOCHA															
ESTACION:		MICRO PAUCARCOCHA				LAT: -12.1321				Departamento : LIMA					
						LONG: -76.0016				Provincia : YAUYOS					
						ALT: 4,720 msnm				Distrito : TANTA					
ITEM	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1	1990	154.51	139.23	144.18	82.21	27.29	19.22	3.69	11.85	31.96	49.29	68.02	115.20	846.7	70.6
2	1991	111.92	109.89	160.11	90.51	14.20	15.40	5.09	15.27	18.21	54.88	33.18	52.30	681.0	56.7
3	1992	77.98	47.82	93.00	33.61	6.58	8.14	8.28	8.57	5.62	71.17	29.79	58.51	449.1	37.4
4	1993	199.27	220.72	174.96	131.10	30.87	6.32	16.81	18.42	33.65	85.77	142.54	181.99	1242.4	103.5
5	1994	212.22	247.60	195.60	105.13	39.52	14.39	7.46	29.33	74.94	45.19	62.76	110.09	1144.2	95.4
6	1995	166.58	112.55	165.12	67.21	16.63	1.38	13.42	0.51	33.44	50.55	53.34	109.37	790.1	65.8
7	1996	239.90	214.60	161.99	99.04	9.86	0.58	0.89	20.93	20.52	49.26	48.03	139.97	1005.6	83.8
8	1997	187.86	233.35	88.40	39.74	6.61	3.51	2.58	36.94	40.96	61.20	119.42	188.31	1008.9	84.1
9	1998	265.80	188.08	181.57	77.77	0.19	6.19	0.54	4.88	20.97	57.42	75.72	111.59	990.7	82.6
10	1999	131.10	293.63	194.97	173.39	65.37	2.65	4.68	3.15	29.33	106.53	88.44	251.34	1344.6	112.0
11	2000	255.87	246.21	258.67	91.08	34.75	0.73	13.02	17.54	36.82	95.67	76.94	189.38	1316.7	109.7
12	2001	251.12	164.17	310.27	57.05	21.04	3.41	9.69	5.34	44.09	68.72	125.74	93.06	1153.7	96.1
13	2002	120.89	209.77	259.81	114.25	23.80	9.39	18.66	9.01	51.62	91.22	120.38	159.67	1188.5	99.0
14	2003	184.06	211.86	214.16	96.77	20.88	3.31	6.23	7.58	25.50	68.08	49.25	197.29	1085.0	90.4
15	2004	47.52	242.72	129.29	75.00	11.64	8.35	2.75	13.24	73.17	92.99	88.53	205.51	990.7	82.6
16	2005	106.23	135.89	193.49	115.52	7.77	2.70	1.08	7.23	34.69	32.01	25.89	196.00	858.5	71.5
17	2006	225.22	184.85	264.54	119.07	3.38	8.29	1.17	26.88	42.47	81.51	129.12	158.42	1244.9	103.7
18	2007	214.24	158.00	267.98	118.67	27.65	5.00	0.79	2.09	18.38	82.02	63.74	129.62	1088.2	90.7
19	2008	251.83	247.92	105.46	56.91	4.48	1.01	0.63	13.03	19.23	66.93	51.37	148.45	967.3	80.6
20	2009	196.01	284.39	176.00	115.51	21.16	3.22	6.10	27.18	14.66	133.71	173.19	257.54	1408.7	117.4
21	2010	250.44	169.61	197.95	69.21	7.61	0.00	0.00	0.00	20.62	38.46	61.82	224.02	1039.7	86.6
22	2011	261.18	223.72	234.51	121.96	9.16	0.08	1.57	9.25	57.99	76.28	98.85	184.15	1278.7	106.6
23	2012	105.16	251.13	196.37	117.59	11.91	1.19	2.77	0.00	57.38	78.72	64.46	140.94	1027.6	85.6
24	2013	162.70	187.16	166.07	42.45	25.14	4.71	7.57	27.28	9.72	50.29	58.96	92.80	834.8	69.6
25	2014	184.75	142.92	218.00	78.29	5.69	0.32	4.44	2.81	43.83	42.08	62.32	183.49	968.9	80.7
26	2015	273.91	169.84	218.11	131.49	17.74	3.44	0.00	26.65	24.12	44.65	76.36	149.94	1136.2	94.7
27	2016	76.05	205.80	150.90	58.02	10.03	3.70	5.71	1.18	7.23	40.68	10.15	159.00	728.5	60.7
28	2017	325.54	267.56	327.42	68.60	27.69	5.66	0.59	3.91	26.88	81.86	50.29	69.51	1255.5	104.6
29	2018	233.45	149.01	261.11	104.59	7.32	9.38	20.80	21.25	2.66	107.28	53.01	63.41	1033.3	86.1
30	2019	223.94	206.15	206.33	58.69	18.93	3.88	6.75	0.00	22.00	33.58	112.03	179.88	1072.1	89.3
N° DATOS		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
MEDIA		189.91	195.54	197.21	90.35	17.83	5.19	5.79	12.38	31.42	67.93	75.79	150.03	1039.36	86.61
DESV.STD		67.52	55.26	57.79	31.84	13.28	4.66	5.62	10.39	18.14	24.39	36.96	53.90	209.74	17.48
C.V.		0.36	0.28	0.29	0.35	0.74	0.90	0.97	0.84	0.58	0.36	0.49	0.36	0.20	0.20
P.MAXIMA		325.54	293.63	327.42	173.39	65.37	19.22	20.80	36.94	74.94	133.71	173.19	257.54	1408.68	117.39
P.MINIMA		47.52	47.82	88.40	33.61	0.19	0.00	0.00	0.00	2.66	32.01	10.15	52.30	449.06	37.42

INFORMACIÓN DE OTRAS VARIABLES CLIMATICAS:

En todo análisis hidrológico, se analizan variables climáticas (evapotranspiración potencial, precipitación, viento, evaporación, radiación solar, humedad relativa, además temperatura) del área de análisis con el objetivo de detectar, detallar además valorar clima promedio de la región. Esto es fundamental, ya que clima es un elemento primordial que influyen en proyectos de explotación de recursos hídricos.

Para selección de estaciones climáticas, se tomaron en cuenta criterios como la cercanía a área de proyecto, la altitud, las características geográficas y distancia entre las estaciones.

TEMPERATURA:

De la red meteorológica empleada en este estudio, se analizan tres (03) estaciones ubicadas cerca del área de investigación: Carania, Vilca y Yauyos. En estaciones se observa comportamiento promedio de temperaturas medias por mes, así como los registros de valoraciones por mes extremos, tanto mínimos como máximos.

Tabla 4.37: Temperatura promedio mensual

Estación	Altitud	Temperatura Media Por Mes (°C)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
CARANIA	3875	9.0	8.8	8.9	9.0	8.7	8.8	8.5	8.9	9.3	9.5	9.6	9.0	9.0
VILCA	3864	9.6	9.7	9.7	9.8	9.1	8.8	8.6	9.0	9.5	9.6	9.8	9.7	9.4
YAUYOS	2327	17.6	17.5	17.5	17.6	17.4	17.2	17.1	17.6	17.8	17.9	17.8	17.7	17.6

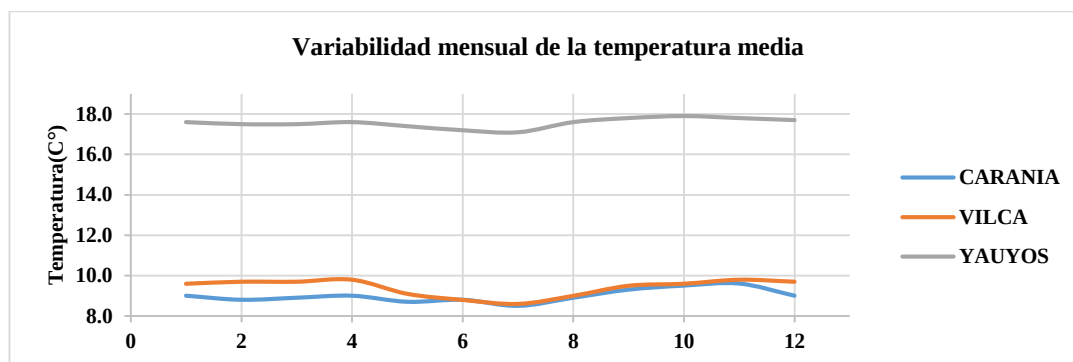


Figura 4.56: Variación por mes multianual de temperatura

HUMEDAD RELATIVA:

Es una variable que interactúa dinámicamente con otros factores climáticos, como la nubosidad, la precipitación y la temperatura. Representa cuantía de vapor de agua en atmósfera, la cual está directamente relacionada con temperatura. Para modelar comportamiento de sistema, como una cuenca, es importante considerar que su régimen está influenciado por la estacionalidad. Los niveles más altos de humedad relativa suelen registrarse entre los meses de diciembre y abril (correspondientes a las estaciones de verano), mientras que valores más bajos se visualizan entre mayo y noviembre (estaciones de otoño e invierno).

Tabla 4.38: Humedad relativa promedio mensual

Estación	Altitud	Humedad Relativa Media Por Mes												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
YAUYOS	2327	89.7	89.2	89.0	87.5	86.7	85.3	83.5	84.2	83.9	84.5	85.3	86.9	86.3
CAÑETE	500	79.8	78.9	78.8	79.6	83.2	84.8	85.0	85.4	84.8	83.2	81.8	80.4	82.1
PACARAN	700	78.2	76.2	74.9	77.2	81.0	82.8	82.2	81.0	79.2	76.1	78.8	76.5	78.7

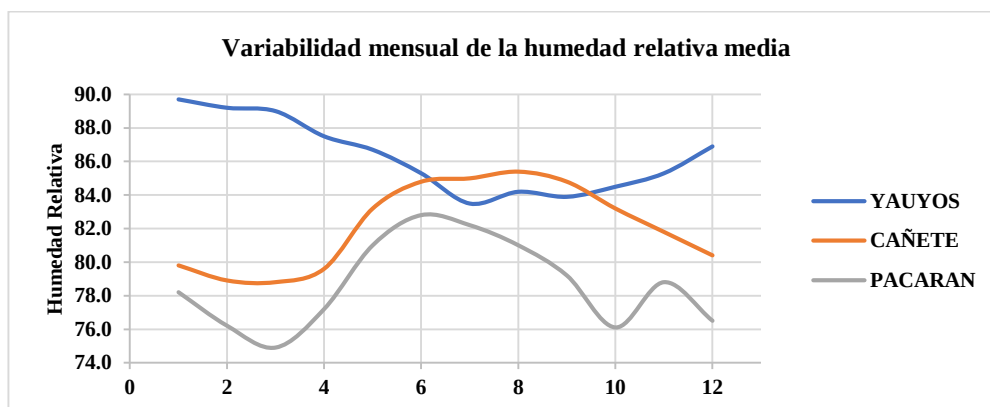


Figura 4.57: Variación por mes multianual de humedad relativa

VELOCIDAD DE VIENTO:

Desplazamiento de aire sobre superficie terrestre es causado por el gradiente de presión atmosférica, el cual resulta del calentamiento desigual de superficie y masas de aire. La dinámica general de aire, en vinculación con su contenido de temperatura asimismo humedad, tiene una relevancia significativa desde el punto de vista geográfico.

Tabla 4.39: Velocidad de viento promedio por mes

Estación	Altitud	Velocidad de Viento Media Por Mes (m/s)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
CAÑETE	500	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.2
PACARAN	700	3.3	3.2	3.1	3.0	2.6	2.6	2.6	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4	3.0
YAUYOS	2327	1.9	1.8	1.7	2.0	2.2	2.2	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	1.9	2.1

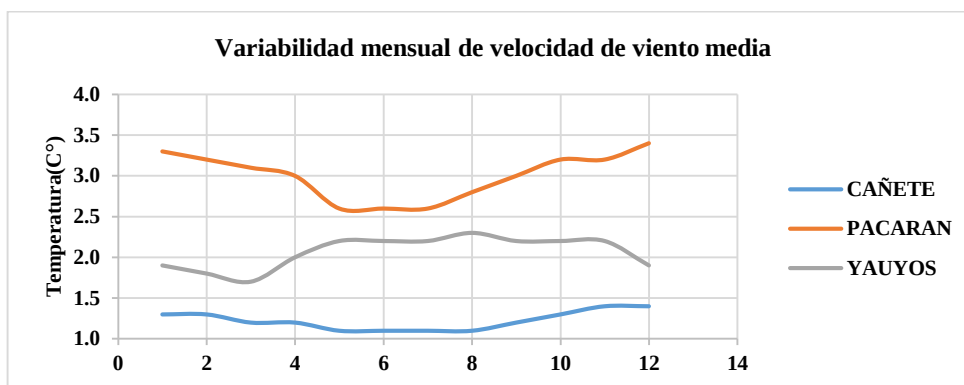


Figura 4.58: Variación por mes multianual de velocidad de viento

RADIACIÓN SOLAR – HORAS SOL:

La radiación solar es principal fuerza impulsora de ciclo de agua; cuando energía solar alcanza a la tierra, calienta las masas de agua como océanos, ríos además lagos, lo que provoca evaporación de agua. El vapor de agua se eleva a la atmósfera, en donde llega a enfriarse, condensarse y generar nubes; posteriormente, agua regresa a superficie de la tierra como precipitación (nieve, lluvia, etc.).

Tabla 4.40: Radiación solar promedio mensual

Estación	Altitud	HORAS DE SOL												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
CAÑETE	500	6.1	6.5	6.7	7.1	5.0	2.3	1.8	1.7	2.2	3.7	4.5	5.6	4.4
PACARAN	700	5.1	5.0	5.4	7.1	7.7	7.6	7.7	8.0	8.1	8.2	8.0	6.4	7.0
YAUYOS	2327	4.1	3.6	3.8	5.3	6.4	6.5	6.6	7.0	6.8	6.1	5.8	4.1	5.5

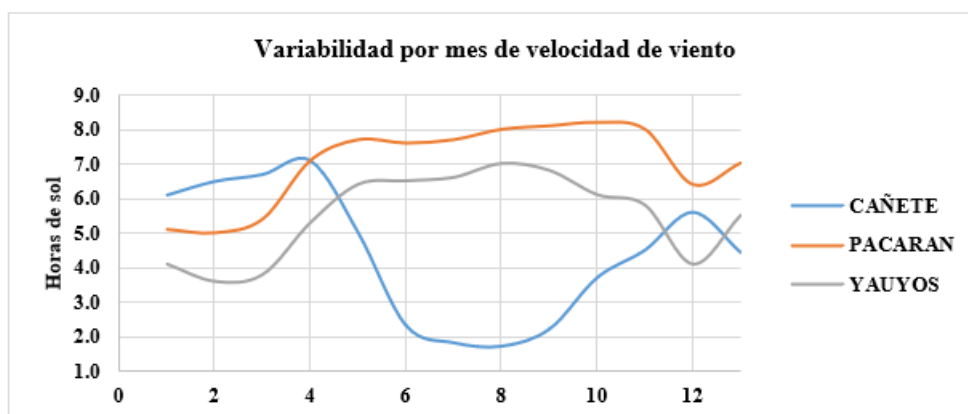


Figura 4.59: Variación mensual multianual de la radiación solar

COBERTURA VEGETAL:

La cobertura vegetal en microcuencas de análisis conforme MINAM pertenece correspondientemente lo detallado posteriormente y se visualiza en mapa de cobertura vegetal.

Tabla 4.41: Tipo de cobertura vegetal para las microcuencas

SIMB	COBERTURA VEGETAL	PITICOCHA		PAUCARCOCHA	
		Área (km2)	Porcentaje	Área (km2)	Porcentaje
ESV	Área altoandina con escasa y sin vegetación	20.578	35.88%	88.702	29.97%
BO	Bofedal	0.004	0.01%	6.723	2.27%
GLA	Glaciar	4.069	7.09%	15.081	5.10%
L/CO	Lagunas, lagos y cochas	2.969	5.18%	10.831	3.66%
PJ	Pajonal andino	29.734	51.84%	174.592	59.00%
TOTAL		57.355	100.00%	295.928	100.00%

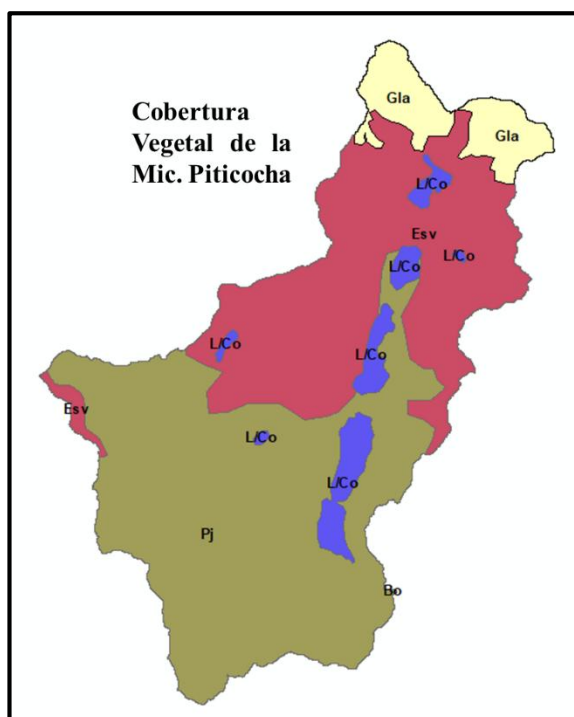


Figura 4.60: Mapa de cobertura vegetal de microcuenca Piticocha

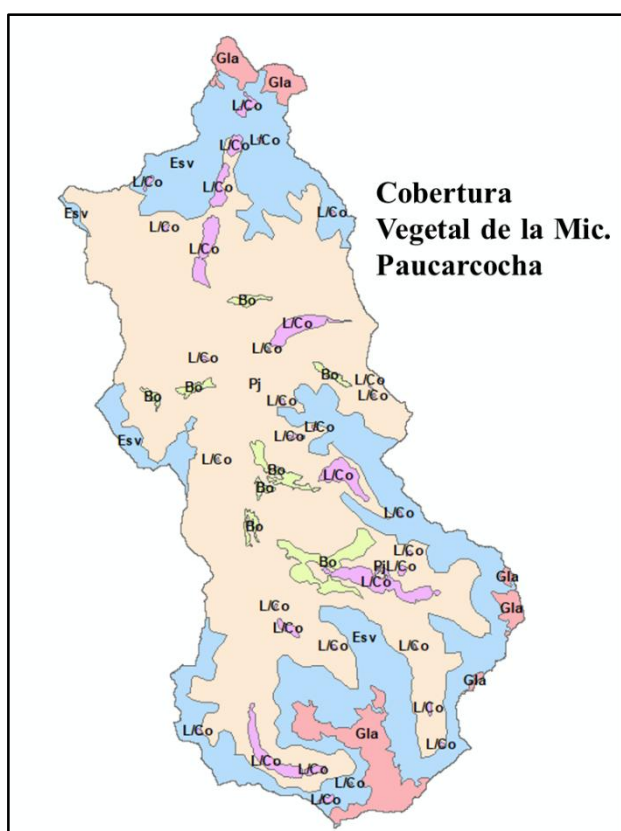


Figura 4.61: Mapa cobertura vegetal de microcuenca Paucarcocha

MODELAMIENTO EN WEAP:

Programa WEAP incluye modelo conceptual de transformación de precipitación a escorrentía conocido como "Método de Humedad del Suelo" (Soil Moisture Method). El modelo empleado para simular contribuciones hídricas de las microcuencas Piticocha y Paucarcocha.

El modelo hidrológico de WEAP es de tipo semi-distribuido, lo que significa que el área de estudio se divide en microcuencas (catchments). Datos de clima, como temperatura, precipitación, velocidad del viento además humedad relativa son ingresados como información de entrada para cada subcuenca, las que se clasifican según el tipo de cobertura del suelo.

En WEAP, reservorios se modelan de manera independiente al caudal de río. Representación de los embalses se estructura en 4 zonas, ordenadas de arriba hacia abajo: área de control de inundación, preservación, amortiguamiento e inactiva. Las áreas de preservación además amortiguamiento contienen agua aprovechable para su uso en embalse. WEAP garantiza que la zona de control de inundación siempre esté disponible, permitiendo liberación de agua desde área de preservación para satisfacer demandas de usuarios o para producción de energía hidroeléctrica.

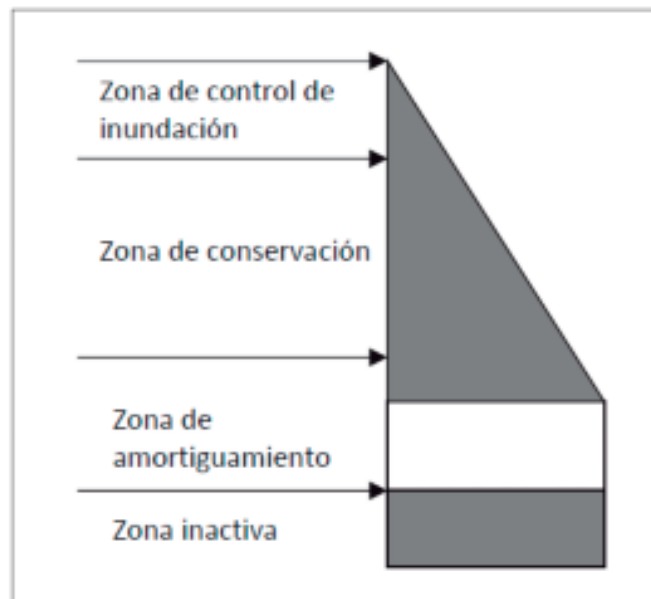


Figura 4.62: Áreas modelación de embalses en WEAP

Cuando nivel de almacenaje de agua disminuye hasta alcanzar lugar de amortiguamiento, liberación del agua se regula mediante coeficiente de amortiguamiento establecido por operador. Por otro lado, agua ubicada en área inactiva no está utilizable para su uso. De esa forma, WEAP ayuda a simular elemento de preservación de agua en gestión y operación de embalses.

APLICACIÓN DEL MODELO INFORMÁTICO WEAP:

Para comenzar con esquema, es fundamental delimitar superficie de cuenca y sus subcuencas, así como trazar línea de drenaje. Además, en el proceso se establece lapso de registro (1990-2019) para modelo de río de las microcuencas en estudio.

A continuación, se describen subcuencas o unidades de análisis, un total de 2, basadas en puntos en el cual se desea evaluar la oferta hídrica.

Tabla 4.42: Microcuencas en estudio

MICROCUENCA	ÁREA (KM2)	PERÍMETRO (KM)	ESTE (M)	NORTE (M)	ELEV MEDIA (MSNM)
PAUCARCOCHA	295.92844	128.95	577,411.44	1,562,755.69	4719.80
PITICOCHA	57.35516	56.28	579,794.62	1,558,654.35	4748.23

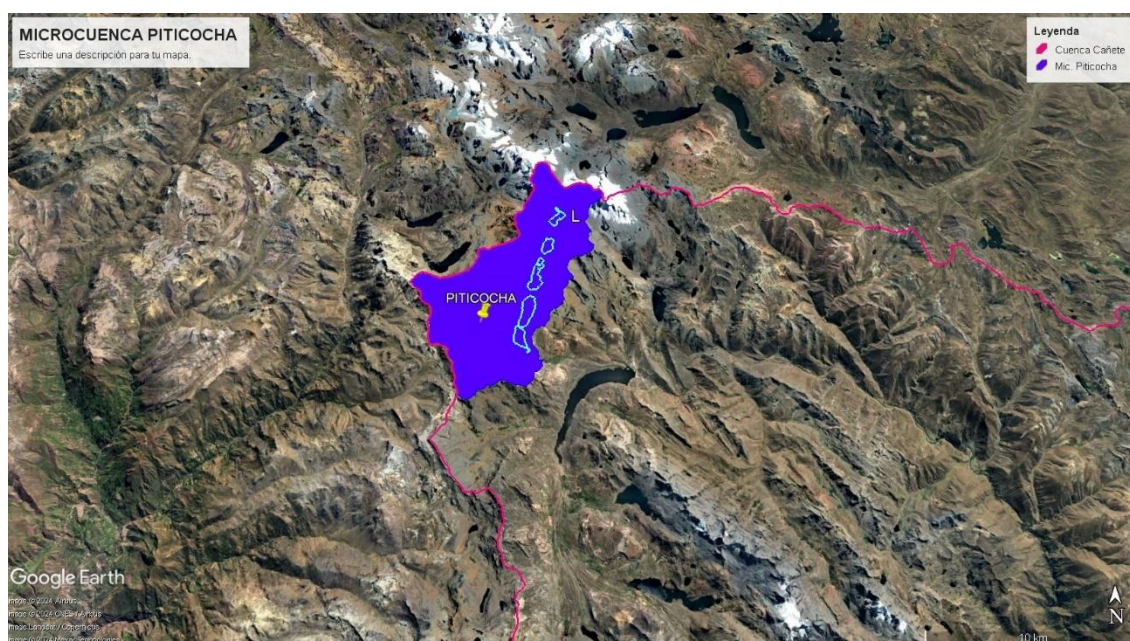


Figura 4.63: Ubicación de la microcuenca Piticocha



Figura 4.64: Ubicación de la microcuenca Pucarcocha

DEFINICIÓN DEL ESQUEMA TOPOLÓGICO:

Para comenzar, es esencial establecer los límites a nivel geográfico y temporal conforme con necesidades de análisis y la disponibilidad de información recogida.

Delimitación geográfica abarca las microcuencas de Piticocha y Pucarcocha, mientras que el marco temporal cubre el período de 1990 a 2019, con información a nivel de mes.

Tras revisar datos de SIG, se construye el esquema del área de estudio, considerando diversos elementos de cuenca, como ríos, acciones de afianzamiento hídrico asimismo puntos de interés relevantes.

En la fase, también delimitan áreas de captación, conocidas como unidades básicas hidrológicas o catchments, que, para fines prácticos, coinciden con los límites de las microcuencas bajo análisis.

Adicional a esto, contaremos con los ríos y quebradas (Rivers) principales de las microcuencas y las Línea escorrentía /infiltración (Runoff/Infiltration) las cuales se encargarán de llevar la información proporcionada por las cuencas hacia el río. Esta línea representa cómo fluye el agua desde las áreas de captación (catchments) hasta el curso de agua principal.

WEAP necesita ingreso de información climatológica y cobertura vegetal para estimación de elementos de balance hidrológico en cada unidad (catchmensts).

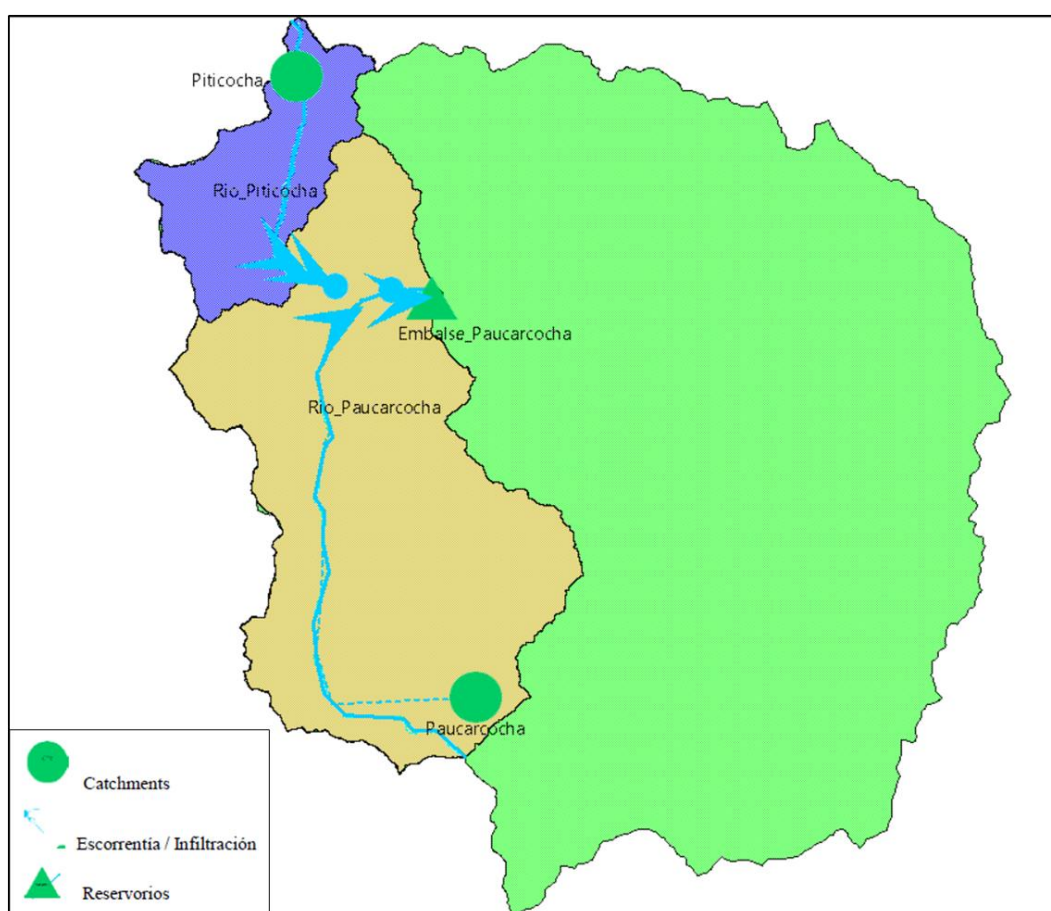


Figura 4.65: Esquema topológico de las microcuencas en estudio

CALIBRACIÓN DEL MODELO:

Calibración de modelo se efectuó de forma manual e iterativa, efectuando ajustes necesarios en funcionamiento, particularmente en parámetros relacionados con la conductividad, la capacidad de almacenaje, el elemento de resistencia a escorrentía y dirección del flujo. Para lograr calibración de modelo hidrológico, se procedió a modificar estos parámetros que influyen directamente en la generación de escorrentía (Método de Humedad del Suelo).

Para cada iteración de modelo, WEAP estima flujos hidrológicos, que luego se transfieren a ríos a través de las líneas de precipitación y escorrentía. Sin embargo, es crucial señalar que el proceso de distribución está limitado por las características del embalse y su capacidad de almacenamiento. Por esta razón, calibración se efectúa en contexto diferente al de embalses.

Procedimiento de calibración, comenzó con correspondientes valoraciones de parámetros:

Tabla 4.43: Valores de inicio de parámetros de modelo WEAP para cuenca Cañete

Parámetro	Definición	Unidades	Rango
kc	Coeficiente vegetativo	–	(variable según cobertura)
SWC	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces	mm	150 - 400
DWC	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda	mm	500 - 1000
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía	–	(variable según cobertura y época)
RZC	Conductividad de zona de raíces	mm/mes	100 - 300
DC	Conductividad de zona profunda	mm/mes	1 - 50
PFD	Dirección preferencial de flujo	–	0 - 1
Z ₁	Almacenamiento inicial en la zona de raíces	%	10 - 50
Z ₂	Almacenamiento inicial en la zona de profunda	%	10 - 50

CALCULO CURVA ALTURA – AREA – VOLUMEN:

Volumen de agua almacenado en embalse se detalla por cantidad de agua contenida en cuenca a la altura puntual de la presa y vertedero. Para estimar esta capacidad, emplea cartográfica de área de almacenaje. En resumen, se establece la localización de presa y elevación de fondo del río, y luego se estima área cubierta por cada curva de nivel. La capacidad total se obtiene integrando estas áreas a lo largo de la altura de almacenamiento, utilizando los relieves de las superficies correspondientes obtenidos a partir de Modelos Digitales de Elevación.

Tabla 4.44: Datos para la curva Altitud–Área–Volumen de Paucarcocha

ALTITUD	AREA	ESPEJO	VOLUMEN	VOLUMEN
	ESPEJO	AGUA		
(M.S.N.M)	(m2)	(Has)	ACUMUL. (m3)	(MM3)
4,240.00	1,406.25	0.14	0.00	0.000
4,241.00	2,187.50	0.22	1,796.88	0.002
4,242.00	3,593.75	0.36	4,687.50	0.005
4,243.00	5,986.56	0.60	9,477.66	0.009
4,244.00	13,924.75	1.39	19,433.32	0.019
4,245.00	22,031.25	2.20	37,411.32	0.037
4,246.00	42,731.68	4.27	69,792.78	0.070

4,247.00	134,065.88	13.41	158,191.56	0.158
4,248.00	1,419,992.44	142.00	935,220.72	0.935
4,249.00	1,511,463.16	151.15	2,400,948.52	2.401
4,250.00	1,591,110.13	159.11	3,952,235.16	3.952
4,251.00	1,675,420.15	167.54	5,585,500.30	5.586
4,252.00	1,761,557.41	176.16	7,303,989.09	7.304
4,253.00	1,854,273.47	185.43	9,111,904.53	9.112
4,254.00	1,959,887.64	195.99	11,018,985.08	11.019
4,255.00	2,092,821.74	209.28	13,045,339.77	13.045
4,256.00	2,210,499.30	221.05	15,197,000.28	15.20
4,257.00	2,323,910.55	232.39	17,464,205.21	17.46
4,258.00	2,429,204.17	242.92	19,840,762.57	19.84
4,259.00	2,521,216.41	252.12	22,315,972.85	22.32
4,260.00	2,597,808.24	259.78	24,875,485.18	24.88
4,261.00	2,678,634.68	267.86	27,513,706.64	27.51
4,262.00	2,757,495.80	275.75	30,231,771.88	30.23
4,263.00	2,838,283.52	283.83	33,029,661.54	33.03
4,264.00	2,914,867.31	291.49	35,906,236.95	35.91
4,265.00	2,998,332.38	299.83	38,862,836.80	38.86
4,266.00	3,076,872.20	307.69	41,900,439.09	41.90

4,267.00	3,154,510.25	315.45	45,016,130.31	45.02
4,268.00	3,230,175.18	323.02	48,208,473.03	48.21
4,269.00	3,308,332.69	330.83	51,477,726.97	51.48
4,270.00	3,382,098.13	338.21	54,822,942.38	54.82
4,271.00	3,448,747.25	344.87	58,238,365.07	58.24
4,272.00	3,511,068.55	351.11	61,718,272.97	61.72
4,273.00	3,565,093.27	356.51	65,256,353.88	65.26
4,274.00	3,610,267.36	361.03	68,844,034.20	68.84
4,275.00	3,646,542.76	364.65	72,472,439.26	72.47
4,276.00	3,675,265.33	367.53	76,133,343.31	76.13
4,277.00	3,695,036.55	369.50	79,818,494.25	79.82
4,278.00	3,708,049.17	370.80	83,520,037.11	83.52
4,279.00	3,717,580.42	371.76	87,232,851.91	87.23
4,280.00	3,724,142.92	372.41	90,953,713.58	90.95
4,281.00	3,728,674.17	372.87	94,680,122.13	94.68
4,282.00	3,730,705.42	373.07	98,409,811.93	98.41
4,283.00	3,731,486.67	373.15	102,140,907.98	102.14
4,284.00	3,733,149.23	373.31	105,873,225.93	105.87
4,285.00	3,734,086.73	373.41	109,606,843.91	109.61
4,286.00	3,735,492.98	373.55	113,341,633.77	113.34

4,287.00	3,736,274.23	373.63	117,077,517.38	117.08
4,288.00	3,736,586.73	373.66	120,813,947.87	120.81
4,289.00	3,736,843.04	373.68	124,550,662.75	124.55
4,289.36	3,736,899.05	373.69	125,890,000.00	125.89
4,290.00	3,736,999.29	373.70	128,287,583.92	128.29

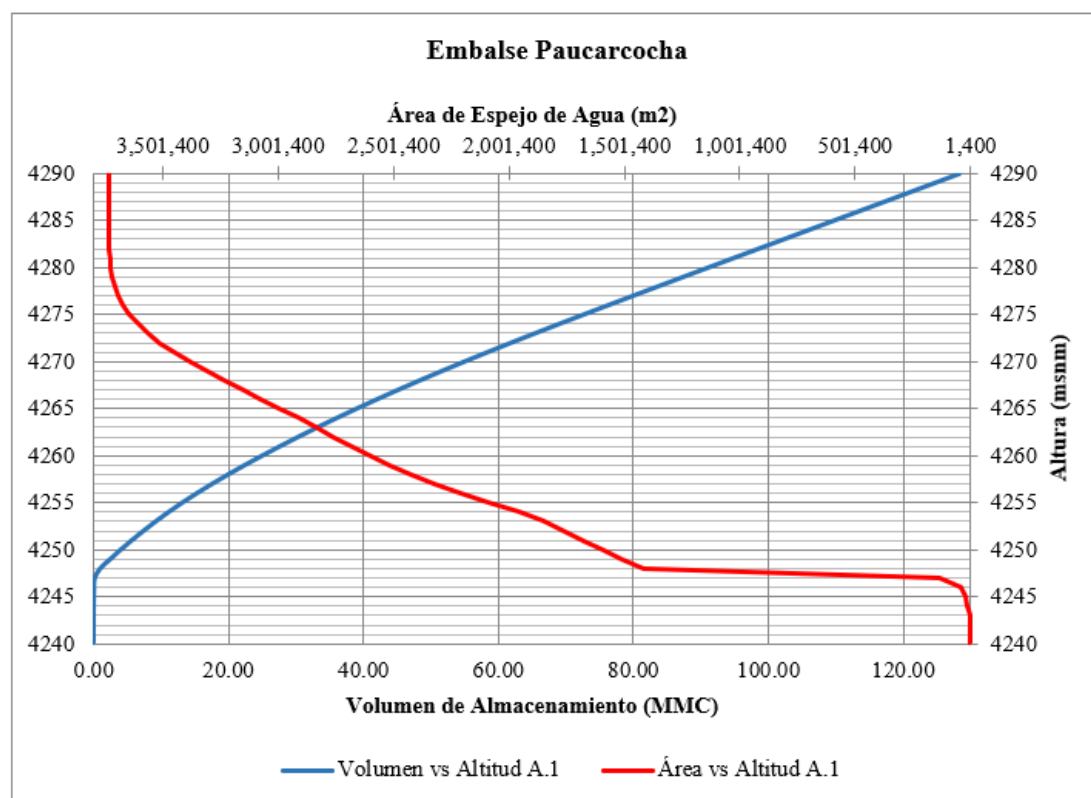


Figura 4.66: Curva Área-Volumen de Paucarcocha

PARÁMETROS FÍSICOS Y REGLAS DE OPERACIÓN:

La operación del embalse se debe restringir a los niveles operativos aprobados en Plan de Manejo Ambiental del Embalse de la Laguna Paucarcocha (Nº 3411- 2008-

MEM/AAE). En correspondiente tabla se detallan parámetros físicos y de operación que son relevantes para la simulación del embalse en WEAP.

Tabla 4.45: Parámetros de operación del embalse Paucarcocha

Característica	Valor	Unidad
Capacidad total del embalse	125.89	hm ³
Parte superior de conservación (NAMO)	109.50	hm ³
Parte superior del volumen inactivo (NAMINO)	38.77	hm ³
Parte superior de amortiguamiento ^a	60.00*	hm ³
Coeficiente de amortiguamiento ^b	0.50*	-
Caudal máximo de descarga controlada	31.69 m ³ /s	m ³ /s

MODELAMIENTO HIDROLÓGICO PARA LAS MICROCUENCAS:

A continuación, se muestran caudales medios por mes producidos partiendo de Método de Humedad del Suelo para las microcuencas Piticocha y Paucarcocha.

Tabla 4.46: Caudales generados para la microcuenca Piticocha

CAUDALES MEDIOS MENSUALES GENERADOS (m ³ /s) - MICRO PITICOCHA														
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM	ANUAL
1990	1.26	1.75	1.92	1.31	0.57	0.39	0.21	0.17	0.24	0.33	0.49	0.91	0.80	9.55
1991	1.13	1.40	1.99	1.42	0.49	0.36	0.21	0.19	0.19	0.34	0.29	0.37	0.70	8.39
1992	0.58	0.53	0.84	0.51	0.24	0.19	0.15	0.13	0.10	0.34	0.26	0.39	0.35	4.26
1993	1.61	3.02	2.76	2.17	0.77	0.40	0.31	0.26	0.32	0.61	1.29	2.03	1.30	15.55
1994	2.81	4.04	3.36	1.98	0.86	0.49	0.30	0.33	0.61	0.48	0.59	0.97	1.40	16.82
1995	1.74	1.70	2.23	1.25	0.53	0.31	0.26	0.17	0.27	0.36	0.43	0.84	0.84	10.09
1996	2.48	3.25	2.71	1.78	0.56	0.34	0.23	0.25	0.25	0.35	0.41	1.07	1.14	13.66
1997	2.01	3.47	1.75	0.91	0.41	0.29	0.20	0.29	0.36	0.48	1.00	1.95	1.09	13.13
1998	3.51	3.35	3.02	1.57	0.48	0.36	0.23	0.19	0.23	0.38	0.59	0.95	1.24	14.86
1999	1.36	4.01	3.36	2.97	1.27	0.52	0.33	0.24	0.31	0.76	0.89	2.68	1.56	18.70
2000	3.66	4.17	4.44	1.98	0.87	0.43	0.34	0.30	0.38	0.73	0.79	1.88	1.67	20.00
2001	3.28	2.94	4.88	1.57	0.70	0.41	0.32	0.24	0.38	0.54	1.11	1.04	1.45	17.39
2002	1.36	2.81	3.98	2.22	0.78	0.48	0.38	0.28	0.45	0.74	1.19	1.76	1.37	16.43
2003	2.37	3.35	3.49	1.91	0.72	0.42	0.30	0.24	0.29	0.49	0.49	1.70	1.31	15.77
2004	0.84	2.88	2.18	1.38	0.54	0.38	0.25	0.24	0.53	0.78	0.92	2.15	1.09	13.05
2005	1.56	2.00	2.74	1.99	0.58	0.37	0.25	0.22	0.31	0.30	0.28	1.44	1.00	12.05
2006	2.68	3.04	4.16	2.32	0.60	0.43	0.28	0.32	0.41	0.65	1.21	1.75	1.49	17.83
2007	2.74	2.69	4.11	2.31	0.83	0.46	0.29	0.22	0.25	0.54	0.60	1.14	1.35	16.19
2008	2.86	3.92	2.11	1.19	0.47	0.32	0.23	0.22	0.24	0.44	0.47	1.20	1.14	13.67
2009	2.20	4.36	3.17	2.12	0.73	0.42	0.30	0.33	0.27	0.94	1.83	3.29	1.66	19.96
2010	3.80	3.18	3.24	1.52	0.56	0.35	0.25	0.19	0.24	0.30	0.46	1.91	1.33	16.00
2011	3.41	3.89	3.96	2.35	0.67	0.40	0.28	0.25	0.45	0.63	0.93	1.89	1.59	19.10
2012	1.48	3.41	3.26	2.16	0.66	0.40	0.28	0.21	0.42	0.62	0.65	1.29	1.24	14.84
2013	1.88	2.77	2.62	1.08	0.61	0.37	0.28	0.31	0.24	0.37	0.49	0.75	0.98	11.76
2014	1.79	2.11	3.10	1.57	0.53	0.34	0.25	0.20	0.34	0.36	0.50	1.55	1.05	12.63
2015	3.39	3.04	3.47	2.38	0.73	0.43	0.27	0.31	0.31	0.38	0.61	1.31	1.39	16.65
2016	0.99	2.45	2.32	1.20	0.50	0.33	0.25	0.18	0.18	0.27	0.19	0.99	0.82	9.86
2017	3.69	4.68	5.66	1.80	0.80	0.45	0.28	0.22	0.28	0.56	0.52	0.63	1.63	19.57
2018	2.25	2.37	3.85	2.06	0.61	0.43	0.37	0.32	0.22	0.70	0.59	0.62	1.20	14.38
2019	2.16	3.13	3.29	1.38	0.62	0.38	0.28	0.20	0.24	0.28	0.78	1.70	1.20	14.42
MAX	3.80	4.68	5.66	2.97	1.27	0.52	0.38	0.33	0.61	0.94	1.83	3.29	1.67	20.00
MIN	0.58	0.53	0.84	0.51	0.24	0.19	0.15	0.13	0.10	0.27	0.19	0.37	0.35	4.26
PROM	2.23	2.99	3.13	1.75	0.64	0.39	0.27	0.24	0.31	0.50	0.69	1.41	1.21	14.55
DES'EST	0.93	0.93	1.01	0.53	0.19	0.07	0.05	0.05	0.11	0.18	0.37	0.66	0.31	3.69

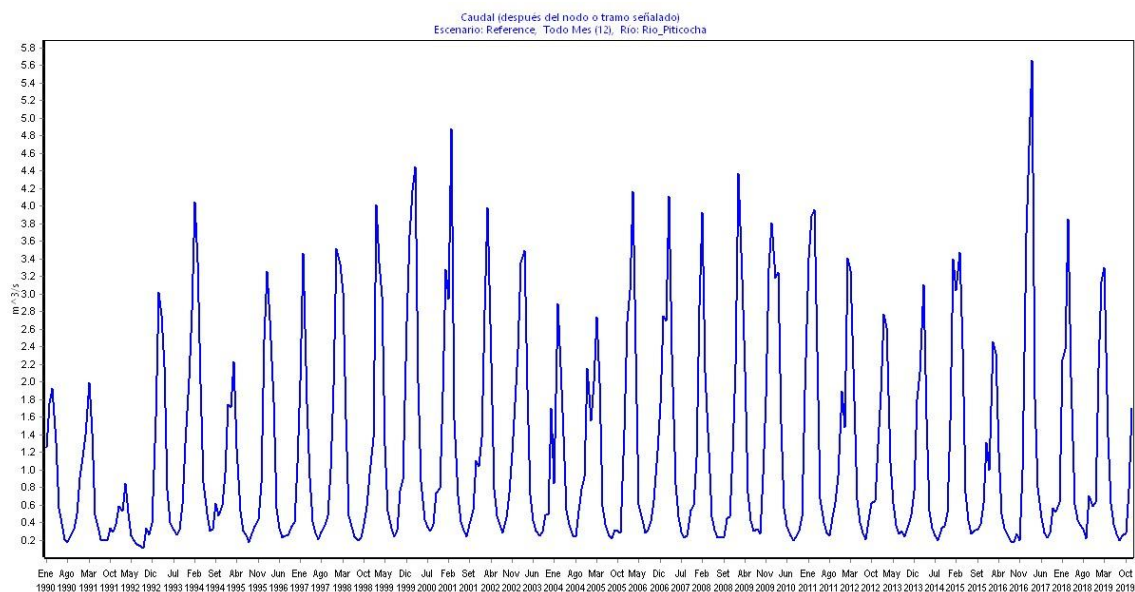


Figura 4.67: Serie de caudales producidos para microcuenca Piticocha en 2D

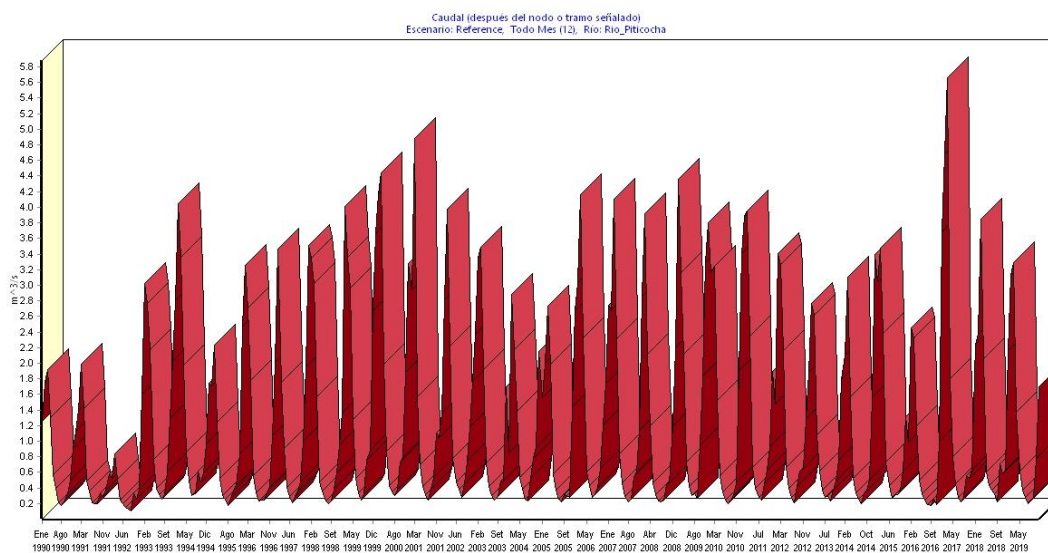


Figura 4.68: Serie de caudales producidos para microcuenca Piticocha en 3D

Tabla 4.47: Caudales generados para la microcuenca Paucarcocha

CAUDALES MEDIOS MENSUALES GENERADOS (m ³ /s) - MICROPaucarcocha														
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM	ANUAL
1990	6.31	8.68	9.49	6.37	2.73	1.86	0.97	0.81	1.11	1.48	2.27	4.28	3.86	46.35
1991	5.41	6.75	9.72	6.91	2.36	1.71	0.99	0.90	0.89	1.53	1.33	1.72	3.35	40.22
1992	2.70	2.46	3.98	2.42	1.16	0.91	0.69	0.58	0.49	1.53	1.19	1.79	1.66	19.89
1993	7.67	14.87	13.66	10.71	3.72	1.93	1.48	1.22	1.46	2.82	6.13	9.86	6.29	75.54
1994	13.85	20.17	16.72	9.73	4.19	2.39	1.45	1.54	2.86	2.24	2.77	4.58	6.88	82.50
1995	8.43	8.30	10.96	6.08	2.56	1.49	1.25	0.83	1.25	1.66	2.02	3.96	4.06	48.77
1996	12.08	16.11	13.39	8.72	2.74	1.63	1.10	1.18	1.17	1.64	1.89	5.06	5.56	66.73
1997	9.79	17.18	8.59	4.43	2.00	1.39	0.99	1.37	1.70	2.22	4.72	9.47	5.32	63.85
1998	17.41	16.61	14.99	7.71	2.34	1.74	1.14	0.94	1.10	1.76	2.74	4.50	6.08	72.98
1999	6.57	19.90	16.67	14.74	6.24	2.56	1.62	1.17	1.47	3.52	4.20	13.08	7.65	91.75
2000	18.21	20.86	22.23	9.74	4.26	2.12	1.68	1.47	1.80	3.43	3.76	9.11	8.22	98.67
2001	16.23	14.54	24.49	7.62	3.45	2.03	1.54	1.17	1.79	2.52	5.23	4.99	7.13	85.60
2002	6.56	13.84	19.85	10.94	3.83	2.34	1.86	1.35	2.13	3.47	5.65	8.54	6.70	80.37
2003	11.63	16.64	17.39	9.42	3.51	2.05	1.47	1.19	1.39	2.28	2.28	8.15	6.45	77.39
2004	4.05	14.18	10.70	6.75	2.62	1.84	1.23	1.15	2.45	3.64	4.35	10.44	5.28	63.41
2005	7.60	9.82	13.52	9.76	2.85	1.84	1.24	1.06	1.46	1.42	1.34	6.85	4.90	58.76
2006	13.14	15.03	20.80	11.44	2.95	2.13	1.35	1.51	1.92	3.02	5.75	8.47	7.29	87.50
2007	13.52	13.28	20.54	11.38	4.07	2.26	1.43	1.10	1.21	2.53	2.82	5.42	6.63	79.55
2008	14.07	19.55	10.38	5.85	2.29	1.56	1.11	1.08	1.15	2.04	2.19	5.71	5.58	66.97
2009	10.72	21.78	15.72	10.46	3.59	2.05	1.45	1.56	1.31	4.39	8.81	16.26	8.18	98.10
2010	18.95	15.76	16.13	7.45	2.74	1.74	1.22	0.96	1.15	1.41	2.15	9.16	6.57	78.82
2011	16.87	19.37	19.78	11.61	3.27	1.97	1.37	1.20	2.13	2.93	4.41	9.17	7.84	94.08
2012	7.21	16.90	16.20	10.64	3.23	1.95	1.37	1.02	1.98	2.90	3.08	6.17	6.05	72.65
2013	9.15	13.64	12.96	5.28	3.00	1.81	1.34	1.46	1.15	1.73	2.27	3.55	4.78	57.34
2014	8.65	10.30	15.38	7.70	2.57	1.65	1.23	0.96	1.58	1.66	2.36	7.42	5.12	61.46
2015	16.79	15.05	17.31	11.77	3.57	2.08	1.33	1.50	1.48	1.77	2.86	6.25	6.81	81.76
2016	4.77	12.02	11.43	5.83	2.42	1.61	1.20	0.90	0.86	1.28	0.91	4.65	3.99	47.88
2017	18.22	23.40	28.48	8.78	3.91	2.20	1.37	1.09	1.35	2.62	2.43	2.96	8.07	96.81
2018	10.91	11.62	19.21	10.11	2.96	2.11	1.77	1.54	1.06	3.28	2.77	2.96	5.86	70.29
2019	10.46	15.48	16.37	6.72	3.03	1.84	1.34	0.96	1.17	1.31	3.61	8.16	5.87	70.44
MAX	18.95	23.40	28.48	14.74	6.24	2.56	1.86	1.56	2.86	4.39	8.81	16.26	8.22	98.67
MIN	2.70	2.46	3.98	2.42	1.16	0.91	0.69	0.58	0.49	1.28	0.91	1.72	1.66	19.89
PROM	10.93	14.80	15.57	8.57	3.14	1.89	1.32	1.16	1.47	2.33	3.28	6.76	5.93	71.21
DESVEST	4.69	4.71	5.14	2.65	0.91	0.33	0.25	0.25	0.50	0.84	1.76	3.30	1.54	18.49

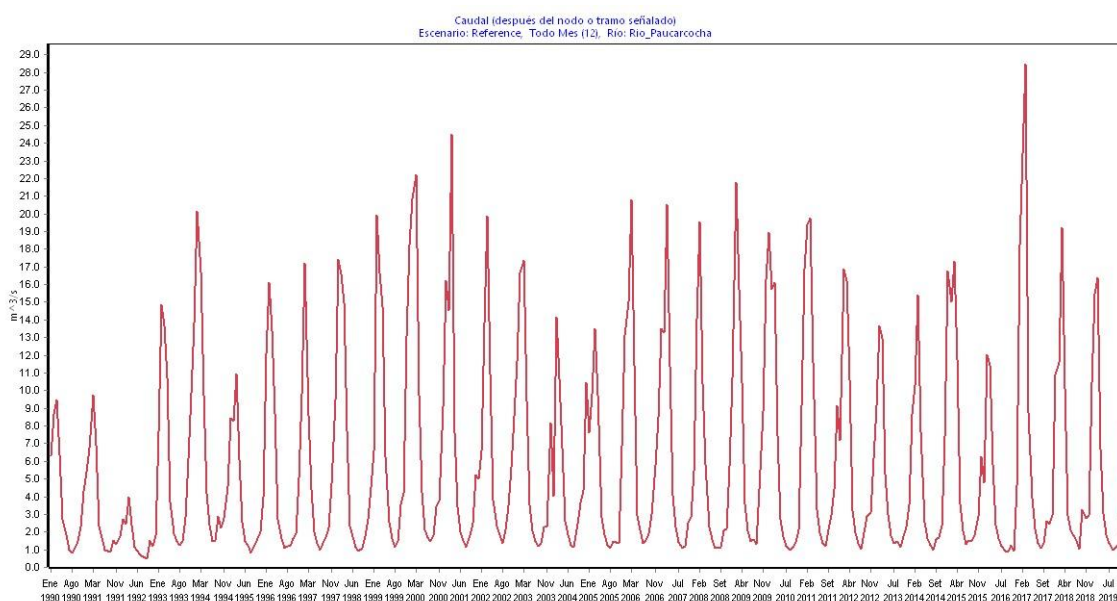


Figura 4.69: Serie de caudales generados para la microcuenca Paucarcocha en 2D

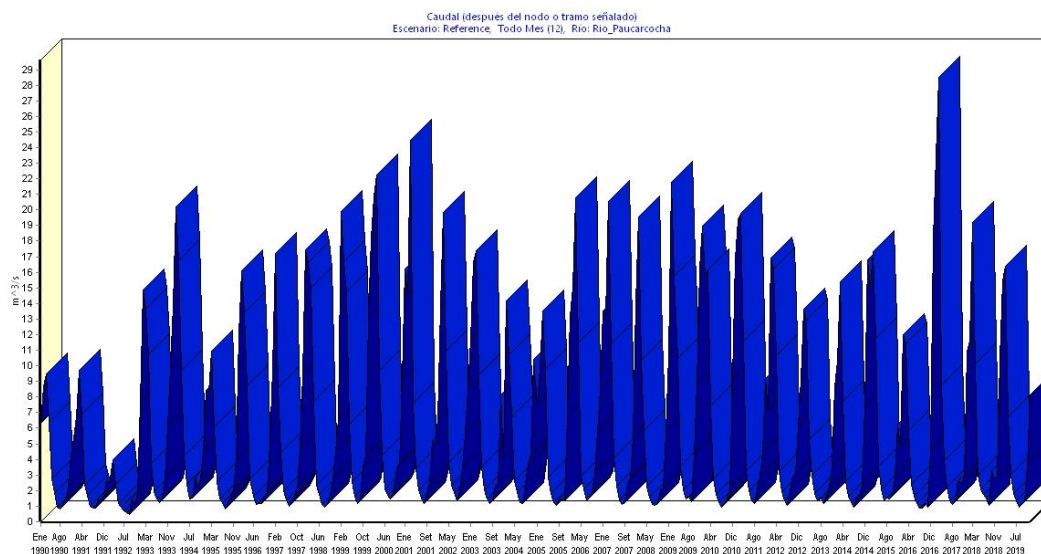


Figura 4.70 Serie de caudales producidos para microcuenca Paucarcocha en 3D

Tabla 4.48: Serie de volúmenes calculados para el embalse Paucarcocha

EMBALSE PAUCARCOCHA													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	41.8	57.7	77.1	84.5	74.8	50.0	44.4	41.6	40.2	39.5	39.1	44.4	635.2
1991	53.7	64.9	84.9	93.7	83.0	57.8	48.3	43.5	41.2	40.0	39.4	39.1	689.4
1992	41.2	42.2	46.9	44.2	41.5	40.1	39.5	39.1	38.9	38.9	38.8	38.8	490.1
1993	54.2	85.0	109.5	109.5	102.4	77.8	49.4	44.1	41.4	40.1	48.0	68.2	829.7
1994	100.0	109.5	109.5	109.5	103.7	80.3	51.2	45.0	41.9	40.3	39.6	45.6	876.0
1995	63.0	77.9	101.2	107.9	97.7	71.9	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	43.8	777.8
1996	71.0	106.2	109.5	109.5	99.8	74.4	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	46.7	831.6
1997	67.8	104.2	109.5	109.5	97.8	71.8	49.4	44.1	41.4	40.1	44.4	63.5	843.4
1998	104.9	109.5	109.5	109.5	98.7	73.6	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	45.2	865.4
1999	57.7	100.7	109.5	109.5	109.2	86.2	57.6	48.2	43.5	41.1	44.0	72.8	880.0
2000	109.5	109.5	109.5	109.5	103.9	79.8	51.3	45.1	41.9	40.3	42.1	60.3	902.7
2001	98.5	109.5	109.5	109.5	101.7	77.3	49.4	44.1	41.4	40.1	45.7	52.8	879.5
2002	65.2	93.5	109.5	109.5	102.7	79.2	51.2	45.0	41.9	40.3	47.0	63.6	848.5
2003	89.5	109.5	109.5	109.5	101.9	77.6	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	55.0	866.9
2004	60.7	91.1	109.5	109.5	99.5	74.6	49.4	44.1	41.4	40.1	43.4	65.1	828.4
2005	80.2	98.8	109.5	109.5	100.1	75.2	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	51.5	839.3
2006	81.6	109.5	109.5	109.5	100.4	76.3	49.4	44.1	41.4	40.1	47.0	63.4	872.1
2007	94.4	109.5	109.5	109.5	103.4	79.6	50.5	44.6	41.7	40.2	39.5	47.8	870.3
2008	80.3	109.5	109.5	109.5	98.6	73.0	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	48.5	843.3
2009	72.0	109.5	109.5	109.5	102.1	77.8	49.4	44.1	41.4	40.1	55.0	92.2	902.5
2010	109.5	109.5	109.5	109.5	99.8	74.7	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	57.7	884.6
2011	97.7	109.5	109.5	109.5	101.2	76.7	49.4	44.1	41.4	40.1	43.5	61.9	884.5
2012	75.9	109.5	109.5	109.5	101.1	76.5	49.4	44.1	41.4	40.1	40.1	50.4	847.6
2013	69.7	97.5	109.5	109.5	100.5	75.6	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	42.7	819.4
2014	60.7	80.5	109.5	109.5	99.3	74.0	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	53.1	801.1
2015	92.9	109.5	109.5	109.5	102.0	77.8	49.4	44.1	41.4	40.1	39.5	50.0	865.7
2016	57.6	82.6	107.2	109.5	98.9	73.5	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	45.6	789.5
2017	89.3	109.5	109.5	109.5	102.9	79.0	49.8	44.3	41.5	40.1	39.5	41.1	856.0
2018	65.2	88.2	109.5	109.5	100.4	76.2	49.4	44.1	41.4	40.1	39.4	41.1	804.6
2019	64.0	96.2	109.5	109.5	100.6	75.7	49.4	44.1	41.4	40.1	41.5	57.1	829.1
Nº Registro	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Promedio	75.66	96.67	105.16	105.91	97.65	73.81	49.37	44.07	41.42	40.10	41.69	53.63	
Maximo	109.50	109.50	109.50	109.50	109.18	86.19	57.60	48.19	43.48	41.13	54.95	92.20	
Minimo	41.17	42.24	46.94	44.20	41.49	40.13	39.45	39.11	38.94	38.86	38.81	38.79	

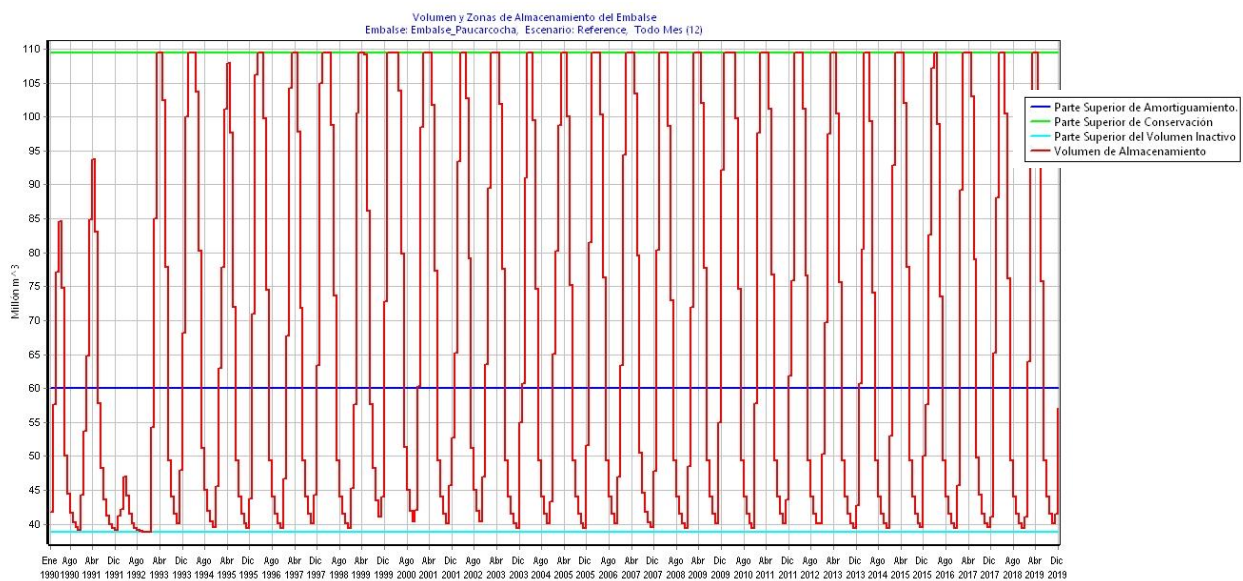


Figura 4.71: Volúmenes generados para el embalse Paucarcocha

FASE 7: ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA QUE SE PODRÍA PRODUCIR

De una tabla anterior (tabla 4.4) se deduce que la cantidad máxima de energía generada durante los años 2016 y 2023 fue de 156.45 GWh al mes; con este valor y cantidad mensual de energía producida se determinó promedio de la cantidad de energía que se dejó de producir por falta de agua, en forma mensual, anual y total, lo cual se detalla en correspondiente tabla.

Tabla 4.49: Energía no producida durante los años 2016-2023

Energía mensual no producida (2016-2023)	64.65 GWh
Energía anual no producida (2016-2023)	763.85 GWh
Energía total no producida (2016-2023)	6110.82 GWh

Por otro lado, en la tabla 4.50 se muestra el caudal de agua disponible para los próximos años en forma mensual, a partir de una curva de duración mensual donde se determinó el Q95.

Tabla 4.50: Caudal disponible mensual a partir del Q95

Q(95%)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM.
93.5%	4.05	6.75	8.39	4.43	2.00	1.39	0.97	0.81	0.86	1.31	1.19	1.79	
96.8%	2.70	2.46	3.98	2.42	1.16	0.91	0.69	0.58	0.49	1.28	0.91	1.72	
95.0%	3.439	4.801	6.494	3.516	1.617	1.170	0.840	0.705	0.691	1.297	1.062	1.757	2.28
Qprom=	10.931	14.802	15.568	8.570	3.139	1.892	1.318	1.159	1.467	2.335	3.277	6.756	5.93
Qeco=10%	1.093	1.480	1.557	0.857	0.314	0.189	0.132	0.116	0.147	0.233	0.328	0.676	0.59
Qdisponible	2.345	3.321	4.937	2.659	1.303	0.980	0.708	0.589	0.545	1.063	0.734	1.082	1.69

Así mismo, en la tabla 4.51 se muestra el caudal de agua disponible para los próximos años en forma mensual, a partir del año crítico, el cual corresponde al año 1992, donde se determinó el volumen crítico y luego el caudal crítico.

Tabla 4.51: Caudal disponible mensual a partir del año critico

VOLUMEN MENSUAL AÑO CRITICO (Mm3) - MICRO PAUCARCOCHA													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1992	41.2	42.2	46.9	44.2	41.5	40.1	39.5	39.1	38.9	38.9	38.8	38.8	40.8
CAUDAL MENSUAL AÑO CRITICO (m³/s) - MICRO PAUCARCOCHA													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1992	2.70	2.46	3.98	2.42	1.16	0.91	0.69	0.58	0.49	1.53	1.19	1.79	1.66
Qeco'(10%)	0.270	0.246	0.398	0.242	0.116	0.091	0.069	0.058	0.049	0.153	0.119	0.179	0.17
Ordisonible	2.432	2.217	3.583	2.174	1.044	0.817	0.622	0.524	0.439	1.374	1.070	1.609	1.49

Además, en la tabla 4.52 se muestra el caudal de agua disponible para los próximos años en forma mensual, a partir de resultados promedios, el cual corresponde a un rango de valores entre los años 1990 y 2019, donde se determinó el caudal mínimo.

Tabla 4.52: Caudal disponible mensual partiendo de resultados promedios

CAUDALES MEDIOS MENSUALES: 1990-2019 (m³/s) - MICRO PAUCARCOCHA													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
MAX	18.95	23.40	28.48	14.74	6.24	2.56	1.86	1.56	2.86	4.39	8.81	16.26	10.84
PROM	10.93	14.80	15.57	8.57	3.14	1.89	1.32	1.16	1.47	2.33	3.28	6.76	5.93
MINIMO	2.70	2.46	3.98	2.42	1.16	0.91	0.69	0.58	0.49	1.28	0.91	1.72	1.61
Qeco'(10%)	0.270	0.246	0.398	0.242	0.116	0.091	0.069	0.058	0.049	0.128	0.091	0.172	0.16
Qdisponible	2.432	2.217	3.583	2.174	1.044	0.817	0.622	0.524	0.439	1.148	0.818	1.549	1.45

Finalmente, de la tabla 4.53 se estima la energía que se podría generar en forma mensual y anual para los próximos años, a partir del caudal disponible, así como el factor de planta, se detalla en correspondiente tabla.

Tabla 4.53: Indicador de mejora

Energía mensual promedio mejorado	98.95 GWh
Energía anual promedio mejorado	1187.40 GWh
Factor de planta promedio mejorado	62%

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Del estudio realizado sobre las proyecciones, se deduce que caudal del río se incrementará en primeros meses de año, disminuyendo luego en forma significativa. Este comportamiento también se repite en el caso del caudal turbinado con la variación que el incremento y la disminución es menor.

Para el caso de la potencia efectiva, energía generada y factor de planta, la proyección realizada indica que, debido al incremento del agua en los meses de avenida, esto va a influir en las variables indicadas, obteniéndose un incremento los primeros meses del año, disminuyendo luego en forma gradual en lo que resta del año.

Del estudio realizado sobre lagunas presentes en parte alta de la cuenca como fuentes hídricas para contrarrestar la falta de agua en ciertas épocas del año, se deduce que hay una reserva importante de agua el cual se ha mantenido en el tiempo, convirtiéndose en una excelente alternativa para alimentar a la central en las épocas de estiaje.

Del balance realizado entre cantidad de agua necesaria para producir energía eléctrica y la cantidad de agua disponible de las lagunas se puede deducir que existe el recurso hídrico disponible a fin de abastecer a la central, con lo que se podría mejorar la producción de energía, así como el factor de planta.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se halló relación directa entre caudal turbinado y la potencia efectiva, caudal turbinado y energía generada, caudal turbinado y factor de planta de central hidroeléctrica en estudio durante su operación en los intervalos de tiempo.

Se estableció relación entre caudal ecológico y caudal turbinado en operación de central hidroeléctrica de pasada, siendo el caudal ecológico equivalente a diferencia entre caudal del río y turbinado.

Se comprobó que con la inyección adicional de agua a la central hidroeléctrica de pasada a través de los reservorios naturales durante la época crítica de operación de la central hidroeléctrica se consigue optimizar indicadores de producción.

Se cuantificó la cantidad de energía eléctrica que se podría producir de manera adicional si se aprovechara la oferta hídrica de las microcuencas propuestas, siendo la energía eléctrica promedio mensual de 99 GWh y la energía eléctrica promedio anual de 1187 GWh, mejorando el factor de planta a un valor promedio de 62%.

La metodología planteada en la presente investigación ha permitido determinar la disponibilidad del recurso hídrico en las microcuencas en estudio a fin de incrementar el caudal de la central y con ello mejorar la potencia y energía generada en tiempos de estiaje.

Se indicó que la central hidroeléctrica de pasada opera con un factor de planta regular, bajo condiciones actuales de carga y operación, siendo el valor promedio de 58%, lo cual indica un regular aprovechamiento de la energía hidráulica disponible.

Utilizando métodos hidrológicos, se determinó el caudal ecológico para la central hidroeléctrica en estudio, siendo su valor promedio por encima a lo que establece ANA.

Se evaluaron estrategias para asegurar sostenibilidad a plazo largo de central hidroeléctrica, incluyendo gestión apropiada de recursos hídricos y adaptación a posibles cambios climáticos que puedan afectar el caudal y la disponibilidad de agua. Estas estrategias se basan en la inyección de agua adicional en épocas de estiaje a partir de microcuencas aguas arriba previamente identificadas y estudiadas para los fines mencionados.

Se identificaron variables climáticas y atmosféricas las cuales son claves para la viabilidad de las microcuencas propuestas, a fin de incrementar la oferta hídrica de la central en estudio, dichas variables son: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y cobertura vegetal.

5.2 RECOMENDACIONES

Se formularon recomendaciones específicas para encargados de la toma de decisiones y gestores de central hidroeléctrica de El Platanal, con el objetivo de optimizar eficiencia energética, mermar efectos impactos ambientales y fortalecer integración de criterios ecológicos en la planificación y gestión de proyectos hidroeléctricos.

Se identificaron áreas adicionales de investigación que podrían profundizar en la comprensión de los impactos ambientales y energéticos de las centrales hidroeléctricas de pasada, como integración de energías renovables complementarias o desarrollo de modelos predictivos más precisos.

Para mejorar el aprovechamiento de una central hidroeléctrica, se pueden considerar varias estrategias y tecnologías: tales como: mejora en la eficiencia de las turbinas, optimización del diseño del embalse y la presa, sistemas de control y monitoreo avanzados, integración de sistemas de almacenamiento, predicción hidrológica avanzada, gestión integrada de cuencas, mejora en la infraestructura de transmisión, programas de mantenimiento preventivo, integración con otras fuentes renovables y mitigación del impacto ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Smith, J. (2018). Energy analysis of hydroelectric power plants in Latin America. *Renewable Energy*, 123, 692-701.
- López, PA, Gómez-Valencia, B., & Torres, A. (2017). Pronóstico de generación de energía hidroeléctrica a corto plazo considerando los niveles de los embalses. *Revista internacional de energía eléctrica y sistemas de energía*, 87, 43-51.
- González, A., García-González, J., & Uche, J. (2019). Centrales hidroeléctricas: Una revisión de modelos de simulación y herramientas para operación y planificación. *Energías*, 12(22), 4200.
- Gutiérrez, I., Flores, L., & López, R. (2016). Análisis de ciclo de vida de una central hidroeléctrica de pasada en la cuenca del río Mantaro, Perú. *Revista de Investigación en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 7(1), 1-10.
- Rodríguez, J., González, C., & Valdivia, A. (2018). Potencial de la energía hidroeléctrica en Perú: una revisión. *Revista de Investigación en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 9(2), 1-14.
- Sánchez, E., Ramos, L., & Guerrero, J. (2015). Evaluación de impacto ambiental de una central hidroeléctrica de pasada en la cuenca del río Urubamba, Perú. *Revista de Investigación en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 6(2), 1-11.
- Torres, J., Gómez, M., & Pérez, R. (2013). Análisis del potencial energético de los ríos en la región de Cusco, Perú. *Revista de Investigación en Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 4(1), 1-8.

- Pérez, A. B. (2019). Impacto Ambiental de Centrales Hidroeléctricas en Ecosistemas Fluviales. *Ecología y Conservación del Medio Ambiente*, 15(3), 87-101.
- Ullah, S., Ali, R., Alam, M., & Ali, S. (2021). Performance analysis of a micro hydro power plant in a mountainous region of Pakistan. *Journal of Renewable Energy*, 174, 41-52.
- Ramírez, J. A., Pantoja, C. A., & Mera, J. A. (2019). Evaluación de la viabilidad técnica y económica de centrales hidroeléctricas de pasada en Colombia. *Revista de Investigación Académica*, 20, 1-12.
- González, J. (2019). Diseño de centrales hidroeléctricas de pasada. Universidad Politécnica de Madrid.
- López, A. (2021). Diseño y optimización de centrales hidroeléctricas de pasada.-
Martínez, R. (2017). Aspectos de diseño de vertederos de centrales hidroeléctricas de pasada. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(2), 63-72.
- Rodríguez, M. (2020). Turbina hidráulica de pasada para centrales hidroeléctricas. *Revista de Energías Renovables*, 45(3), 127-140.
- Smith, T. (2018). Embalses de regulación en centrales hidroeléctricas de pasada. *Journal of Renewable Energy Engineering*, 12(4), 201-215.
- Brown, A. (2017). Feasibility studies for small hydropower projects. *Renewable Energy*, 101, 1025-1035.
- García, M. (2015). Determination of the optimal head for small hydropower development. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 20(3), 112-120.

- Johnson, R. (2021). Turbine selection for small-scale hydropower projects. *International Journal of Hydropower*, 26(4), 76-84.
- Martínez, R. (2019). Regulatory considerations for small hydropower plants
- Brown, A. (2018). Comprehensive water resource management for small hydropower. *Renewable Energy*, 116, 235-245.
- García, M. (2020). Turbine efficiency and its impact on hydroelectric power generation. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 25(2), 89-98.
- Johnson, R. (2022). Height optimization in small-scale hydropower projects. *International Journal of Hydropower*, 27(1), 56-63.
- Martínez, R. (2021). Maintenance and operation strategies for small hydropower plants. *Journal of Renewable Energy*.
- Fernández, J. M., Pérez, L. F., & Martínez, E. R. (2015). Evaluación del Factor de Planta en Centrales Hidroeléctricas de Pasada. *Revista de Energías Renovables*, 22(2), 65-78.
- Smith, A. R., & Rodríguez, J. P. (2018). Implicaciones del Factor de Planta en la Estabilidad de la Red Eléctrica. *Journal of Electrical Engineering*, 41(4), 315-330.
- Almeida, R. A. S., Lopes, R. F., & de Oliveira, L. (2021). Análise do desempenho energético de uma central hidrelétrica de pequeno porte. In *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar* (Vol. 1, No. 1, pp. 1-10).
- Velasco, H. M., Jaramillo, W. A., Gutiérrez, D. A., & Castañeda, J. A. (2019). Evaluación exergética de una central hidroeléctrica de pasada en Colombia. *DYNA*, 86(208), 52-59

- Lopes, R. F., Almeida, R. A. S., & de Oliveira, L. (2018). Análise ecológica de uma central hidrelétrica de pequeno porte. In *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar* (Vol. 1, No. 1, pp. 1-10).
- Velasco, H. M., Jaramillo, W. A., Gutiérrez, D. A., & Castañeda, J. A. (2019). Evaluación exergética de una central hidroeléctrica de pasada en Colombia. *DYNA*, 86(208), 52-59.
- González-Sánchez, P., Llop, M., García-Olivares, A., & Suriñach, E. (2020). Environmental and socioeconomic impacts of small hydropower plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109877.
- Stojadinovic, B., Djordjevic, B., & Stojadinovic, M. (2021). The impact of small hydropower plants on regional sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110142.
- Amoako, C. A., Mensah, J. V., & Asomani, M. (2019). Socio-economic impacts of small scale hydropower development in Ghana: A case study of the Chiana mini-hydropower plant. *Journal of Energy in Southern Africa*, 30(3), 55-68.
- Sánchez-Cañizares, C., Pérez-Corona, M. E., & Riquelme-Santos, J. C. (2021). Cultural heritage and small hydropower plants in Spain: Analysis of the regulatory framework and protection measures. *Journal of Cultural Heritage*, 50, 266-276.
- Vezzani, M. J., Fernández, C., & Bistoni, M. A. (2021). Environmental flow assessment for the operation of a small run-of-river hydropower plant in a highly regulated basin. *Journal of Environmental Management*, 295, 113086.

- García-Asorey, M., Bruder, A., Luchini, L. C., Angelucci, M., & Castellarini, F. (2021). Defining minimum environmental flows in small hydropower plants: A participatory approach. *Science of the Total Environment*, 778, 146297.
- Gómez, J. (2019). Ecological flow assessment in regulated rivers: A review of methods and applications. *Environmental Management*, 64(3), 267-284.
- López, A. (2020). Species-based approaches for environmental flow assessment in rivers. *River Research and Applications*, 36(3), 321-335.
- Martínez, R. (2021). Ecosystem-based environmental flow assessment in rivers: Concepts and applications. *Freshwater Biology*, 66(1), 125-142.
- Rodríguez, M. (2017). Habitat-based approaches for environmental flow assessment in rivers.
- Torres, S. (2018). Environmental impact assessment of hydroelectric power projects: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1126-1139.
- López, J. A., & Mendoza, L. F. (2017). Modelo Integrado para la Optimización Energética y Ambiental de Centrales Hidroeléctricas de Pasada. *Revista de Energías Renovables*, 24(1), 35-48.
- Rivera, G. M., Pérez, H. R., & Gómez, E. A. (2019). Modelo de Flujo de Potencia para Centrales Hidroeléctricas de Pasada. *Journal of Electrical Engineering*, 42(3), 210-225.
- Jiménez, A. B., & Torres, M. J. (2020). Modelo de Cambio Ecológico para la Evaluación de Impactos en Ríos por Centrales Hidroeléctricas. *Ecología y Conservación del Medio Ambiente*, 16(1), 45-60.
- Villanueva, R. (2010). *Centrales Hidroeléctricas*. ISBN: 978-612-4072-05-5

ANEXO 1

Anexo 1: Datos de entrada de la central hidroeléctrica de El Platanal (2016-2023)

MES	CAUDAL RIO CAÑETE (m3/s)	CAUDAL TURBINADO (m3/s)	POTENCIA (MW)	ENERGIA (GWh)
1	24.39	21.35	165.89	87.84
2	52.74	33.55	218.89	109.28
3	85.56	37.93	213.60	124.75
4	47.13	17.01	169.20	137.60
5	85.56	37.93	212.50	71.80
6	14.28	7.76	152.70	45.40
7	13.10	10.70	136.40	43.00
8	13.00	10.93	159.70	44.00
9	13.47	11.19	120.10	45.30
10	14.88	12.81	56.80	52.40
11	14.05	12.20	163.50	48.30
12	13.52	11.28	207.60	46.60
13	93.78	34.96	214.10	141.40
14	157.04	38.78	214.70	141.80
15	206.65	36.52	215.90	143.90
16	92.62	36.61	186.70	143.20
17	39.08	34.76	216.10	139.91
18	24.03	22.08	197.20	85.90
19	16.98	15.13	216.50	62.20
20	15.90	14.67	204.60	59.60
21	15.74	13.83	204.70	54.30
22	17.49	16.44	215.90	66.70
23	18.77	16.43	88.60	63.50
24	22.14	20.34	215.90	81.40
25	60.26	35.66	213.80	146.80
26	61.84	39.30	215.80	143.60
27	138.04	37.90	216.80	153.30
28	63.33	38.35	211.40	150.50
29	32.59	28.10	206.40	114.04
30	19.67	17.52	196.90	68.74
31	17.40	15.72	180.90	63.46

32	18.86	16.83	212.20	68.06
33	14.41	12.74	206.20	50.39
34	15.06	13.32	152.40	54.22
35	16.40	14.70	196.20	58.16
36	15.35	13.62	134.00	55.12
37	47.59	25.16	212.90	104.60
38	56.32	35.10	212.90	137.05
39	145.96	37.19	214.00	151.41
40	65.88	38.49	213.30	150.88
41	34.71	30.59	180.70	124.44
42	20.17	17.88	167.80	70.61
43	13.61	13.08	57.00	56.94
44	14.72	12.87	150.00	53.39
45	17.30	14.37	63.10	57.35
46	16.51	14.20	194.60	59.26
47	17.40	14.70	187.70	68.43
48	65.88	34.17	190.60	138.85
49	56.32	35.10	208.70	142.42
50	97.71	37.33	209.30	141.50
51	82.22	36.80	213.70	148.92
52	64.54	33.63	188.50	131.31
53	30.89	21.77	166.90	87.99
54	18.90	16.27	203.70	63.76
55	18.90	16.27	137.60	52.45
56	15.80	13.23	95.50	53.31
57	14.38	12.26	70.50	47.80
58	17.57	15.39	173.90	62.24
59	14.60	12.76	135.10	48.69
60	42.59	31.47	202.50	127.23
61	135.39	34.01	215.80	137.38
62	80.42	34.85	179.85	127.07
63	102.23	31.57	179.66	127.48
64	88.92	34.96	190.68	136.60
65	25.87	25.46	158.32	102.69
66	19.21	17.15	157.30	67.07
67	14.76	13.12	93.30	53.02

68	15.29	14.07	221.60	56.79
69	17.70	15.99	147.20	62.56
70	18.28	16.30	106.00	65.81
71	19.60	18.36	206.20	71.88
72	42.88	31.17	210.70	125.87
73	47.77	34.01	196.40	137.40
74	92.13	36.02	204.81	131.40
75	114.35	37.09	198.03	149.80
76	77.28	34.94	213.48	136.48
77	26.46	23.96	95.27	96.64
78	25.31	24.74	200.76	94.20
79	18.11	17.25	221.59	66.83
80	17.32	16.92	209.07	60.48
81	16.19	15.76	205.46	55.19
82	18.53	17.72	220.64	70.79
83	19.82	19.14	90.11	63.52
84	22.63	21.03	217.22	88.42
85	61.74	39.65	222.42	149.49
86	63.41	40.62	223.73	146.02
87	149.46	39.00	221.11	156.45
88	64.92	39.15	220.48	154.83
89	33.33	32.82	206.90	120.88
90	19.93	19.17	206.75	77.29
91	18.20	17.52	183.59	66.12
92	20.38	17.23	221.72	69.95
93	15.58	13.81	206.54	57.83
94	17.06	14.98	159.32	55.88
95	16.50	15.89	197.07	59.87
96	17.08	16.90	139.07	61.08

FUENTE: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES)

ANEXO 2

Anexo 2: Primer artículo indexado a una revista científica relacionado a la tesis

Anales Científicos 81(1) 204-219 (2020)



Anales Científicos

ISSN 2519-7398 (Versión electrónica)
Website: <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/index>

Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico

Determination of the ecological flow in hydroelectric power plants of Peru, application to a typical case

Josue Eliezer Alata Rey¹

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Email: josue@lamolina.edu.pe

Recepción: 27/08/2019; Aceptación: 15/05/2020

Resumen

En las diferentes leyes y reglamentos del Perú sobre el uso del agua se trata superficialmente sobre la importancia del caudal ecológico, pero no se determina su obligatoriedad y la cantidad que se debe dejar en el cauce del río para la subsistencia del hábitat en la zona afectada. En los ríos de nuestra Amazonía este problema es irrelevante puesto que siempre disponen de caudales abundantes, aún en la época de estiaje, por lo que en dicha región no se presentan dificultades con el caudal ecológico, lo que si sucede en los ríos costeros, ya que en algunos cauces el caudal se anula y en todo el tiempo de estiaje no se dispone de este vital elemento, causando efectos adversos silvícolas, ecológicos y de salud humana. En este trabajo se pretende elaborar una metodología en base a la experiencia internacional, a fin de calcular exactamente el caudal ecológico que debe dejar aguas debajo de la captación cualquier central hidroeléctrica que utilice las aguas de los ríos costeros del Perú. Como parte práctica se evaluó experimentalmente la central hidroeléctrica de Molloco-Arequipa, a partir de mediciones de caudales mensuales del río Molloco.

Palabras clave: Caudal ecológico; medio ambiente; central hidroeléctrica; desertificación; cuenca hidrográfica; estiaje.

Abstract:

In the different Laws and Regulations of the Peru on the use of the Water, it is superficially about the importance of the ecological flow, but it is not determined there should and the quantity that it should be left in the bed of the river for the subsistence of the habitat in the affected area. In the rivers of our Amazonia this problem is irrelevant since they always have abundant flows, still in the low water time, for what in this region difficulties are not

Forma de citar el artículo: Alata, J. 2020. Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico. *Anales Científicos* 81 (1):204-219(2020).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v81i1.1630>

Autor de correspondencia (*): Email: josue@lamolina.edu.pe

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

presented with the ecological flow, that that if it happens in the coastal rivers, since in some beds the flow is annulled and in the whole time of low water it doesn't have this vital element, causing effects adverse silvicult, ecological and of human health. In this work it is sought to elaborate a methodology based on the international experience, in order to calculate the ecological flow that it should leave waters under the reception any Hydroelectric Power station that uses the waters of the coastal rivers of the Peru exactly. As part practice it was evaluated the hydroelectric power station of Molloco-Arequipa experimentally, starting from mensurations of monthly flows of the river Molloco.

Keywords: Ecological flow; Environment; hydroelectric power; desertification; hydrographic basin; low water.

1. Introducción

El caudal ecológico es un concepto y a la vez una exigencia, para el desarrollo de actividades extractivas, de producción, transformación y servicios, que tienen relación con los recursos hídricos, con la finalidad de contribuir a la protección y conservación ambiental y consecuentemente a la sostenibilidad de las actividades. El caudal ecológico es el caudal mínimo que se requiere para conservar la biodiversidad y los servicios ecológicos de los ríos, el cual debe permitir a los organismos desarrollarse y mantener su población en un buen estado, afirman Jamett y Rodríguez (2010).

La idea de caudal ecológico nace en EEUU en los años 60 como una preocupación por preservar los sistemas acuáticos de los salmones, una especie importante desde el punto de vista económico. Con el transcurrir del tiempo se fueron adicionando nuevos conceptos en los cuales no solamente se tomaban en cuenta peces, sino también otros organismos que forman parte del desarrollo, afirman Meza *et al.* (2017). A continuación, veamos algunos conceptos que existen sobre caudal ecológico:

Según el reglamento de la Ley de Recursos Hídricos en el artículo 153 menciona: Se entenderá como caudal ecológico al volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico

o cultural.

Se asocia al caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un sistema acuático preestablecido, cuando no se tienen datos de antecedentes biológicos del río se utilizarán los métodos hidrológicos. El caudal ecológico debe pensarse o definirse con el propósito de mantener los atributos característicos de un ecosistema, afirma Baeza (2008).

En los ríos donde se construyen estructuras hidráulicas de captación (bocatomas), o regulación (embalses), se considera como caudal ecológico, el flujo aguas abajo de dichas estructuras, cuya cantidad debe permitir la vida acuática en el río, en condiciones adecuadas, así como también satisfacer las necesidades de las poblaciones, animales y vegetales si fuera el caso. Este caudal también debe permitir la dilución de efluentes, la conducción de sólidos y el mantenimiento de las características estéticas y paisajistas del medio, afirma Scotta (2014).

Si bien no se indica, que los valores de caudal ecológico serán mantenidos en los periodos de estiaje, queda sobre entendido que el término de caudal ecológico es aplicable para las condiciones más críticas de disponibilidad de agua, es decir para los meses de estiaje que se presentan entre los meses de abril a noviembre. Los siguientes meses, la disponibilidad de agua es mayor, por lo tanto, los caudales ecológicos se verán superados ampliamente.

La modificación del flujo hídrico para el funcionamiento de centrales hidroeléctricas o por la extracción del agua ha causado cambios en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos. Por esta razón surge el concepto de “caudal ecológico” que pretende proteger mediante la mantención de un cierto volumen de agua dentro del cauce los valores ecológicos de los ríos. Sin embargo, las aproximaciones metodológicas utilizadas para determinar esa cantidad de agua necesaria han sido ampliamente criticadas por estimar caudales mínimos constantes sin criterios ecológicos y sin considerar la importancia de la variabilidad natural del régimen afirma [Peredo-Parada et al. \(2014\)](#). En este trabajo, por tanto, se presentan y analizan los distintos tipos de métodos utilizados a nivel mundial para la estimación de un caudal ecológico apropiado al Perú.

La gestión ambiental de los recursos hídricos afronta un gran desafío puesto a que se maneja un recurso imprescindible para la vida que ha sido reconocido como escaso y que seguirá siendo demandado a altas tasas. Por otra parte, se intenta asegurar la disponibilidad del agua para múltiples usos dentro de los cuales se reconocen aquellos de tipo ambiental, como lo son la navegación, la recreación y la conservación de los ecosistemas acuáticos, entre otros afirma [García de Jalón \(1998\)](#).

2. Material y métodos

Metodologías existentes a nivel mundial

No existe un método óptimo o ideal, para determinar el caudal ecológico apropiado en forma general. Pero si existen una serie de métodos para determinar el caudal ecológico de acuerdo a criterios, objetivos y los servicios ambientales que ofrece la fuente hídrica a lo largo de su recorrido, afirman [Marraco et al. \(2012\)](#). Entre los más comunes, tenemos: Métodos hidrológicos. Métodos hidráulicos. Métodos hidrobiológicos. Métodos holísticos. Métodos eco hidrológicos.

En la [Tabla 1](#), se comparan los métodos en base a aspectos ecológicos y de gestión. Se detalla si los métodos contienen indicadores para su revisión, así como su grado de aplicabilidad en distintos tipos de ecosistemas. Se consideran de baja aplicabilidad métodos que no pueden ser utilizados en la mayoría de los ecosistemas acuáticos, como por ejemplo, los métodos hidráulicos que consideran ríos con cauces estables y secciones rectangulares. En cuanto a métodos de aplicabilidad alta con precaución, se refiere a que pueden ser aplicados en una alta variedad de ecosistemas acuáticos, pero con el cuidado de no adoptar los valores que se determinan con los métodos en diferentes ecosistemas; solo serían generalizables sus procedimientos. Los costos que en ella se presentan son relativos a los costos de los métodos con que se comparan, así mismo la complejidad fue estimada por estos investigadores tomando en cuenta el tiempo requerido para llevar a cabo la determinación, el grado de conocimientos y la necesidad de personal calificado o número de especialistas.

Situación actual en el Perú

En el Perú la autoridad competente “Autoridad Nacional del Agua” dependencia que pertenece al Ministerio de Agricultura, aún no ha definido la metodología a aplicar, sin duda debido a la heterogeneidad de regímenes hídricos de cada una de las cuencas del país, tal como se menciona: “Las metodologías para la determinación del caudal ecológico, serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función a las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos específicos a ser alcanzados”. Dejando a potestad de las empresas ejecutoras, la estimación de los caudales ecológicos, con criterios subjetivos y aplicables a cada uno de los espacios donde se desarrollan los proyectos.

Tabla 1. Comparación de métodos

Aspectos Ecológicos		Aspectos de Gestión			
Tipo	Objetivos de conservación	Indicador	Aplicabilidad	Complejidad	Costos relativos
Hidrológico	En general, poblaciones y peces	SI	Baja	Baja	Bajos
Hidráulico	Ecosistemas	SI	Alta con precaución	Baja a media	Medios
Hidro-biológico	En general, poblaciones y peces	SI	Baja	Baja a media	Bajos a medio
Holístico	En general, poblaciones y peces	SI	Baja	Media a alta	Altos
Eco-hidrológico	Ecosistemas, valores económicos y culturales	SI	Alta	Media	Medios a altos

Fuente: (Jamett y Rodríguez, 2010).

Los caudales ecológicos se fijarán en los planes de gestión de los recursos hídricos en la cuenca. Para su establecimiento, se realizarán estudios específicos para cada tramo del río. Actualmente, el Perú cuenta con 14 macro cuencas y 103 cuencas

hidrográficas (Figura 1), es por ello que para determinar los caudales ecológicos no se puede considerar un solo método generalizado a diferencia de otros países europeos.

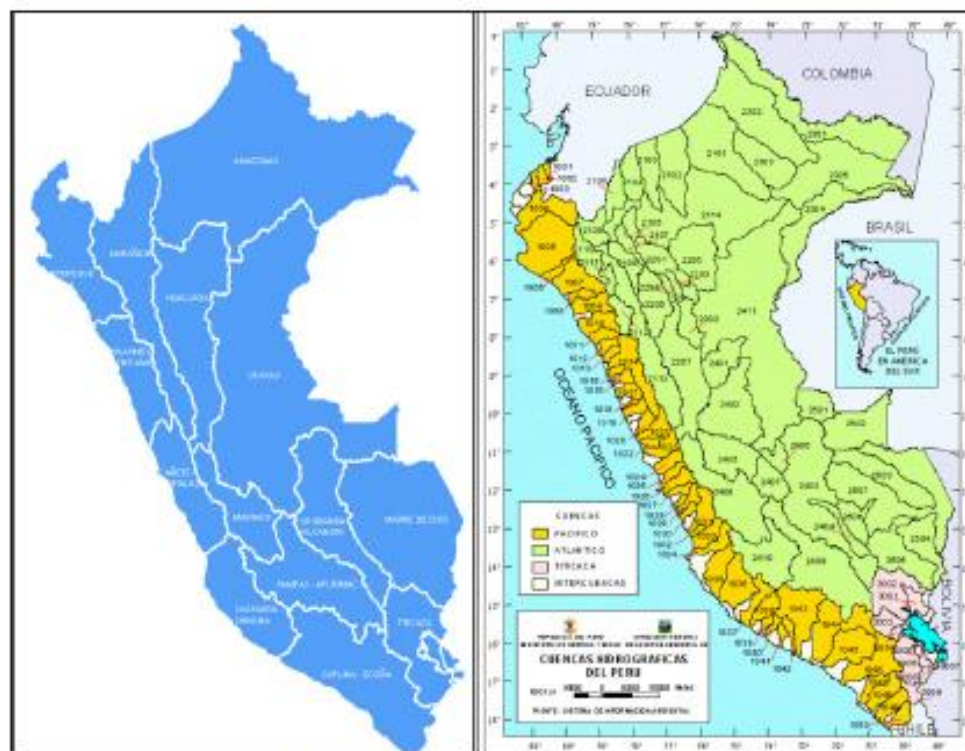


Figura 1. Cuencas hidrográficas del Perú

Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico

Evaluación de la calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua que deben ser monitoreados entre la captación y la descarga de las instalaciones hidráulicas, y/o mineras, tienen que guardar relación con los contaminantes potenciales que pueden estar presentes en las aguas residuales. Los parámetros que se muestran a continuación, deben estar incluidos, como mínimo, en cualquier programa de monitoreo de calidad del agua, como en centrales hidráulicas, extracción de petróleo, aguas residuales de las refinerías de petróleo, y explotación minera.

Parámetros de monitoreo

Los parámetros de monitoreo son: Temperatura, pH, Aceites y grasas, Demanda bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales Disueltos, Oxígeno Disuelto, Conductividad eléctrica, Cianuro libre, Sólidos totales suspendidos, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Cloruros, Sulfatos, Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Amoniacal, Sulfuros, Fenoles, Hidrocarburos totales de Petróleo, Metales totales, Mercurio, Coliformes Totales; afirma [Palomino \(2016\)](#). Los requisitos y estándares de calidad del agua se observan en las [Tablas 2, 3 y 4](#).

Tabla 2. Requisitos para muestras de agua

Parámetro	Material del frasco	Volumen requerido	Conservación o preservación	Tiempo máximo para análisis
pH			determinación en campo	
Temperatura			determinación en campo	
Turbiedad	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	24 horas
Alcalinidad	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	24 horas
Color	P o V	500 mL	refrigerar a 4°C	48 horas
Sólidos sedimentables	P o V	1000 mL	refrigerar a 4°C	48 horas
	P o V	1000 mL	refrigerar a 4°C	7 días
Cloruros	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Fluoruros	P o V	300 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Sulfatos	P o V	100 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Conductividad	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Dureza	P o V	500 mL	Agregar HNO ₃ hasta pH <2	3 meses
Oxígeno disuelto			determinación en campo	
DBO	P o V	1000 mL	refrigerar a 4°C	24 horas
Fosfato	V	200 mL	refrigerar a 4°C	18 horas
Cianuros	P o V	1000 mL	Agregar HaOH hasta pH = 12 refrigerar a 4°C	14 días 24 h / sulfuros
Nitritos	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	48 h
Nitratos	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	48 horas 28 /clorada
Aceites y grasas	V ámbar boca ancha	1000 mL	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días
DQO	P o V	200 mL	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días
Metales				
En general	P o V	1000 mL	Agregar HNO ₃ hasta pH <2	2 meses
Arsénico	P o V	500 mL	Agregar HNO ₃ hasta pH <2 refrigerar 4°C	2 meses
Mercurio	P o V	500 mL	Agregar HNO ₃ hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días
Hidrocarburos	V	1000 mL	Agregar CHI hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días

Fuente: DIGESA

Tabla 3. Estándares de calidad del agua, categoría 1: poblacional y recreacional

PARÁMETRO	UNIDAD	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable			Aguas superficiales destinadas para recreación	
		A1	A2	A3	B1	B2
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Contacto primario	Contacto secundario
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
FÍSICOS Y QUÍMICOS						
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	1	1	1	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,005	0,022	0,022	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,085	0,08	0,08	0,08	**
Cloruros	mg/L	250	250	250	**	**
Color	Color verdadero escala Pt/Co	15	100	200	Sin cambio normal	Sin cambio normal
Conductividad	US/cm(a)	1500	1600	**	**	**
D.B.Q.	mg/L	3	5	10	5	10
D.Q.O.	mg/L	10	20	30	30	50
Dureza	mg/L	500	**	**	**	**
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	0,5	Na	0,5	Ausencia de material flotante
Fenoles	mg/L	0,003	0,01	0,1	**	**
Fluoruros	mg/L	1	**	**	**	**
Fósforo Total	mg/LP	0,1	0,15	0,15	**	**
Materiales Flotantes		Ausencia de material flotante	**	**	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos	mg/LN	10	10	10	10	**
Nitritos	mg/LN	1	1	1	1(5)	**
Nitrógeno amoniacal	mg/LN	1,5	2	3,7	**	**
Olor		Aceptable	**	**	aceptable	**
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥ 6	≥5	≥4	≥5	≥4
pH	Unidad de pH	6,5-8,5	5,5-9,0	5,5-9,0	6-9 (2,5)	**
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1000	1000	1500	**	**
Sulfatos	mg/L	250	**	**	**	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**	**	0,05	**
Turbiedad	UNT(b)	5	100	**	100	**

Fuente: DIGESA

Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico

Tabla 4. Estándares de calidad del agua, categoría 2: actividades marino costeras

PARAMETRO	UNIDADES	AGUA DE MAR		
		Sub Categoría 1	Sub Categoría 2	Sub Categoría 3
		Extracción y cultivo de Moluscos Bivalvos (C1)	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas (C2)	Otras Actividades (C3)
ORGANOLEPTICOS				
Hidrocarburos de Petróleo		No Visible	No Visible	No Visible
FÍSICO QUÍMICOS				
Aceites y grasas	mg/L	1	1	2
DBO5	mg/L	*	10	10
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥4	≥3	≥2,5
pH	Unidad de pH	7-8,5	6,8-8,5	6,8-8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	**	50	70
Sulfuro de Hidrogeno	mg/L	**	0,06	0,08
Temperatura	Celsius	***delta 3°C	***delta 3° C	***delta 3° C
INORGÁNICOS				
Amoniaco	mg/L	**	0,08	0,21
Arsénico total	mg/L	0,05	0,05	0,05
Cadmio total	mg/L	0,0093	0,0093	0,0093
Cobre total	mg/L	0,0031	0,05	0,05
Cromo Vi	mg/L	0,05	0,05	0,05
Fosfatos (P-P04)	mg/L	**	0,03-0,09	0,1
Mercurio total	mg/L	0,00094	0,0001	0,0001
Níquel total	mg/L	0,0082	0,1	0,1
Nitratos (N-NO3)	mg/L	**	0,07-0,28	0,3
Plomo total	mg/L	0,0081	0,0081	0,0081
Silicatos (Si-SiO3)	mg/L	**	0,14-0,70	**
Zinc total	mg/L	0,081	0,081	0,081
ORGÁNICOS				
Hidrocarburos de petróleo totales (fracción aromática)	mg/L	0,007	0,007	0,01
MICROBIOLOGICOS				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	* £14 (área aprobada)	£30	1000
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	* £ 88 (área restringida)		

Fuente: DIGESA

Información de la Central Hidroeléctrica

En la cuenca del río Molloco, se cuenta con dos centrales hidroeléctricas a la vez, sus especificaciones técnicas lo vemos en la Tabla 5.

C.H. Molloco I (4 grupos Pelton de 50 MW c/u), con la bocatoma en el embalse

Japo, túnel de aducción a presión de 7630 m de longitud y 2,8 m de diámetro con 16,4 m³/s de capacidad de conducción, chimenea de equilibrio con cámara de expansión superior e inferior, cámara de válvulas en caverna, conducto forzado en subterráneo de 1757 m de longitud, casa de máquinas en caverna y subestación al exterior.

C.H. Molloco II (2 grupos Pelton de 55 MW c/u), toma en Llatica para 16,4 m³/s, túnel de conducción en presión de 3630 m de longitud, 2,8 m de diámetro y 16,4 m³/s de capacidad, chimenea de equilibrio, cámara de válvulas, conducto forzado de 915 m de longitud al exterior y en subterráneo, casa de máquinas en subterráneo y subestación al exterior.

Los embalses están ubicados en los distritos de Choco, Chachas y Orcopampa, en la provincia de Castilla y Caylloma en la región Arequipa. Para la aplicación, se tomó los datos existentes de la Presa Japo.

Información Hidrológica Existente

Para el presente estudio se ha desarrollado en forma exhaustiva la hidrología de la cuenca del río Molloco y la cuenca alta del río Palca (derivación al río Molloco), entre los que se destacan la determinación de los caudales de los ríos Molloco y Palca. Sin embargo es preciso aclarar que la información

hidrológica a nivel nacional es generalmente baja, o con periodos de registro muy cortos, lo cual obliga a utilizar modelos matemáticos para la extensión y generación de descargas o caudales en los puntos de interés.

Para la cuenca del río Molloco se ha utilizado las series históricas de los caudales mensuales del río Molloco. Asimismo, se ha determinado el rendimiento hídrico en la cuenca baja, generando caudales en las sub cuencas que componen la cuenca baja del río Molloco entre la Presa Japo hasta el río Colca. Para la generación de caudales en dichas sub cuencas fue necesario recurrir a la estación de caudales registrados en la Estación La Calera.

En la [Tabla 6](#), se presentan los caudales promedios mensuales del río Molloco en la Presa Japo; se presentan las descargas medias mensuales desde 1984 hasta el 2007; obteniéndose una descarga media anual de 12,85 m³/s.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de las CHs de Molloco

	C.H. Molloco 1	C.H. Molloco 2
Potencia Instalada	200 MW	110 MW
Turbinas	4 turbinas Pelton, 50 MW c/u	2 turbinas Pelton, 55 MW c/u
Tubería forzada (subterráneo)	1757 m.	915 m.
Diámetro de la tubería	2,8 m.	2,8 m.
Caudal nominal	16,4 m ³ /s	16,4 m ³ /s

Fuente: MINEM

Tabla 6. Caudales mensuales del río Molloco

Año	Meses												Media Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1984	30,20	53,60	81,80	25,40	10,50	4,90	3,80	3,40	2,40	2,50	8,80	5,70	19,26
1985	3,90	24,30	52,50	24,80	10,90	5,00	3,90	3,70	3,10	2,40	3,10	4,90	11,81
1986	27,30	47,20	71,10	33,80	14,30	5,80	5,00	3,90	2,90	2,40	2,30	3,60	18,16
1987	32,40	21,20	14,30	7,40	2,90	2,50	1,80	1,40	0,99	2,20	2,20	4,40	7,78
1988	17,70	44,10	61,20	26,00	10,60	5,00	4,00	2,90	2,10	2,80	2,30	3,50	15,03

Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico

Continuación Tabla 6.

1989	23,50	46,80	46,60	13,53	5,20	3,50	2,40	2,30	1,90	2,10	2,40	5,30	12,45
1990	20,20	27,30	24,50	9,10	3,10	2,70	1,80	1,20	0,56	1,40	3,50	4,80	8,26
1991	18,60	41,40	48,90	16,30	6,00	3,70	2,80	2,00	1,80	1,70	2,60	4,30	12,36
1992	11,30	3,40	3,40	6,20	2,40	2,40	1,60	0,93	0,50	0,66	1,70	3,00	4,84
1993	31,60	35,50	42,50	18,90	6,70	4,10	3,20	2,50	2,00	2,70	4,80	5,30	13,21
1994	40,00	54,70	29,60	13,20	6,60	3,60	2,60	2,10	1,50	0,77	1,80	3,20	13,00
1995	10,60	20,10	72,90	15,40	4,50	3,40	2,50	1,30	0,80	0,82	1,70	3,40	11,45
1996	23,10	48,20	24,70	14,10	4,30	3,20	2,60	1,40	0,90	0,87	1,70	2,80	10,44
1997	20,00	48,70	43,70	10,50	3,60	3,10	2,20	1,50	1,80	1,70	1,80	3,10	11,61
1998	49,60	50,30	35,90	11,30	6,80	4,00	2,90	2,00	0,98	0,39	1,80	4,00	14,00
1999	25,90	54,00	68,70	30,90	16,20	6,20	5,20	2,70	2,00	3,80	2,40	3,50	17,33
2000	34,30	56,00	54,40	13,70	5,50	3,60	2,60	1,90	1,30	2,00	2,20	3,10	14,69
2001	43,40	49,60	56,20	25,80	10,70	5,00	4,00	3,20	2,60	2,10	1,70	3,70	17,68
2002	18,60	51,30	55,30	21,60	9,00	4,50	3,50	2,70	2,40	1,80	2,90	4,20	14,49
2003	37,30	51,00	65,00	20,70	8,00	4,50	3,50	2,50	1,70	0,77	1,60	2,90	16,49
2004	32,50	42,70	43,00	17,20	6,70	4,00	3,10	2,40	2,10	1,20	1,60	3,50	13,83
2005	14,10	50,50	48,80	17,50	5,30	3,80	2,90	1,20	0,72	0,40	1,30	2,60	11,61
2006	36,10	40,10	60,40	19,10	8,30	4,40	3,30	2,40	2,00	1,40	2,40	4,20	16,05
2007	17,00	40,16	44,20	16,30	6,30	3,90	3,10	2,10	1,30	0,96	1,90	3,60	11,58
Media	25,73	41,30	46,39	16,86	6,77	3,93	2,99	2,20	1,95	1,85	2,79	4,12	12,85
Máximo	67,80	56,30	81,80	33,9	16,20	6,30	5,60	3,90	4,90	4,00	11,50	11,60	20,72
Mínimo	2,00	7,00	13,80	6,20	2,40	2,20	1,60	0,93	0,50	0,39	1,20	1,80	4,84

Fuente: Informe de Hidrología e Hidráulica del estudio para la Viabilidad Técnico Económico de la C.H. Molloco 2008

Asimismo, en la Figura 2 se presenta el comportamiento del caudal máximo, medio y mínimo del río Molloco.

Metodología en la determinación del caudal ecológico

La metodología a considerar en el presente estudio con el objeto de calcular el caudal ecológico en el Perú consiste en:

A) Disponer de un régimen de caudales mensuales de los últimos 10 años del río

a evaluar.

- B) Aplicar los métodos más usados a nivel internacional, como el Método Ecuatoriano, Escocés, Suizo y Asturiano.
- C) Construir un canal artificial y con la ayuda de un correntómetro controlar el flujo de agua, de acuerdo a los resultados anteriores.
- D) Con los resultados de cada método, realizar mediciones de calidad del agua, a fin de contrastarlo con las normas existentes.

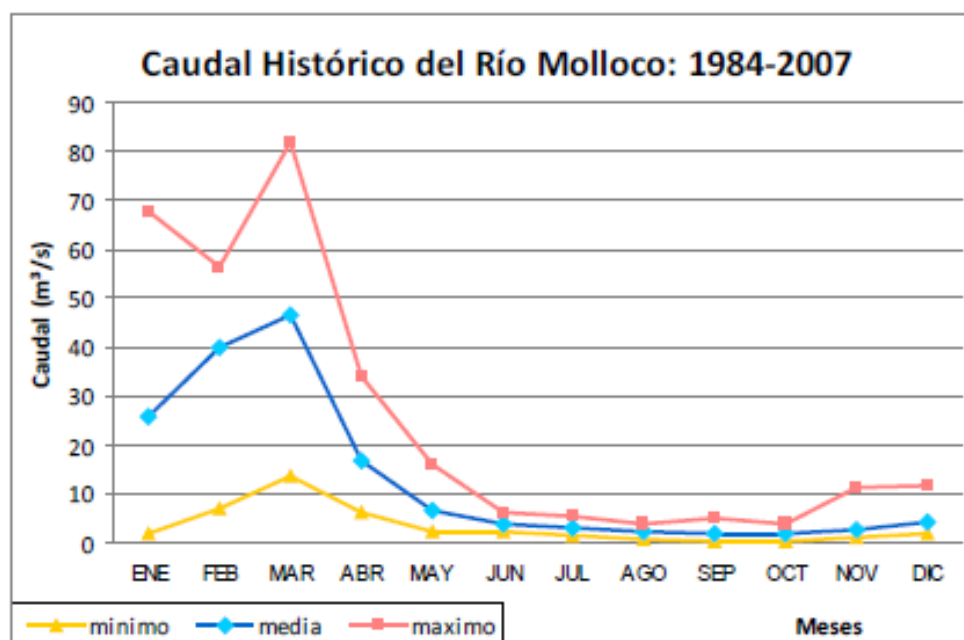


Figura 2. Caudales mensuales del río Molloco

- E) Seleccionar la especie representativa.
- F) Finalmente, el caudal ecológico se determina al promediar los caudales que cumplan con todas las normas establecidas, referentes a la calidad del agua.

Aplicación de los métodos planteados.

Tomando como referencia los métodos planteados, considerando los métodos más usados a nivel mundial, siendo conscientes de la necesidad de preservar las especies más representativas del río Molloco y considerando el factor ecológico y medio ambiental de la zona; se ha tomado como referencia 4 métodos del presente estudio, estos son:

- Método Ecuatoriano.
- Método Escocés.
- Método Suizo.
- Método Asturiano.

Método Ecuatoriano (5% del promedio anual)

$$Q_{ECO} = 5\% * Q_{MEDIA\ ANUAL}$$

$$Q_{MEDIA\ ANUAL} = 12,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ECO} = 0,05 * 12,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ECO} = 0,6425 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Figura 3, se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método del 5% del caudal medio anual que es de 0,6425 m³/s.

Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se tuvo que construir un canal artificial y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de 0,6425 m³/s, luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad (Tabla 7).

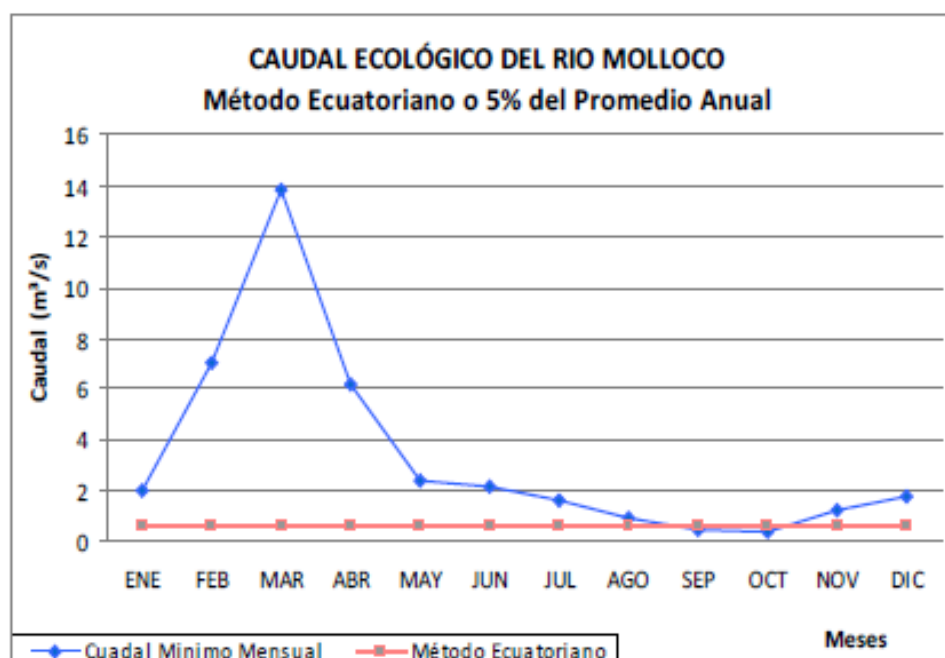


Figura 3. Caudal ecológico: Método Ecuatoriano

Tabla 7. Resultados de las mediciones con el Método Ecuatoriano

Indicadores	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	17	<10	NO
Oxígeno Disuelto	mg/L	3	>5	NO
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	13	25-100	NO
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	5,5	6,5-8,5	NO

De los resultados podemos concluir que dicho caudal no es conveniente, ya que no cumple con todas las normas establecidas.

Método Escocés (3 meses críticos)

Consiste en tomar el 20% del caudal medio mensual de 3 meses críticos consecutivos, de acuerdo a este concepto tenemos que los valores más bajos corresponden a los meses de Agosto, Setiembre y Octubre de 1992.

$$Q_{\text{PROM. 3 MESES CRIT. (1992)}} = (0,93 + 0,50 + 0,66) / 3$$

/ 3

$$Q_{\text{PROM. 3 MESES CRIT. (1992)}} = 0,6967 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{ECO}} = 0,20 * 0,67 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{ECO}} = 0,139 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Figura 4, se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método Escocés ó método de los tres meses más bajos, cuyo resultado es 0,139 m³/s.

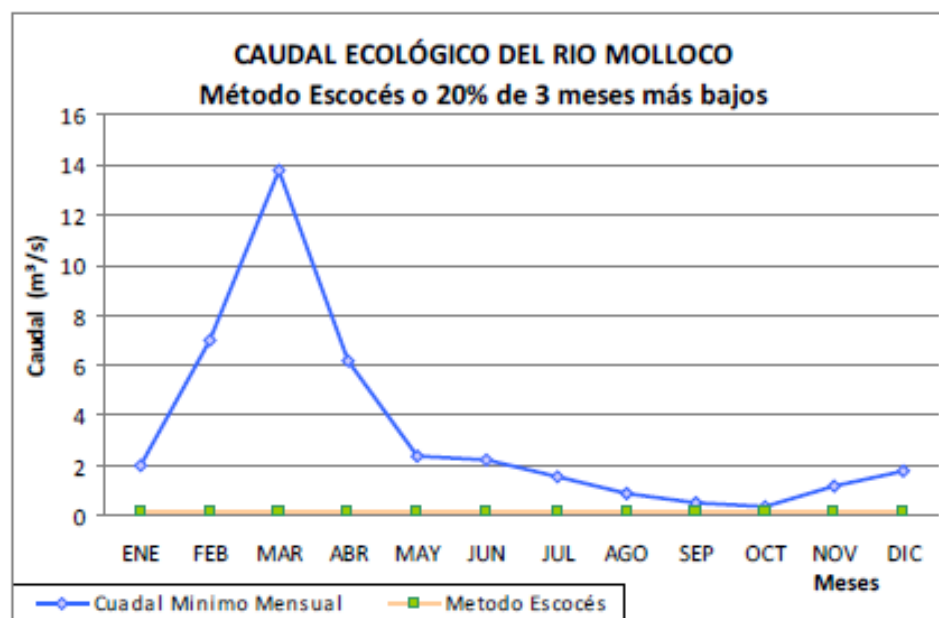


Figura 4. Caudal ecológico: Método Escocés

Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se usó el canal artificial ya construido, y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de 0,139 m³/s, luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad; los resultados de las mediciones se ven en la Tabla 8.

Método Suizo

Considerando el caudal medio anual de los últimos 10 años, se tiene un caudal medio anual de 12,85 m³/s; y considerando un coeficiente de 1,8; valor promedio de lo recomendado, tenemos:

$$Q_{pm} = (a \cdot Q_{M-A}) / 10$$

$$a = 1,8$$

$$Q_{M-A} = 12,85$$

$$Q_{pm} = 2,313 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{pm} = 2313 \text{ l/s}$$

$$Q_{pm} = 560 + 1753 \text{ l/s}$$

Aplicando la metodología, se tiene:

Para $Q_{pm} > 560 \text{ l/s}$; el caudal ecológico mínimo sería 280 l/s, añadiéndose 31 l/s por cada 100 l/s adicionales.

$$Q_E = 280 + 1753/100 \cdot 31$$

$$Q_E = 280 + 543,43$$

$$Q_E = 823,43 \text{ l/s}$$

$$Q_E = 0,823 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Figura 5, se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método Suizo, cuyo resultado es 0,823 m³/s.

Tabla 8. Resultados de las mediciones con el Método Escocés

INDICADORES	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	13	<10	NO
Oxígeno Disuelto	mg/L	2	>5	NO
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	27	25-100	SI
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	4,5	6,5-8,5	NO

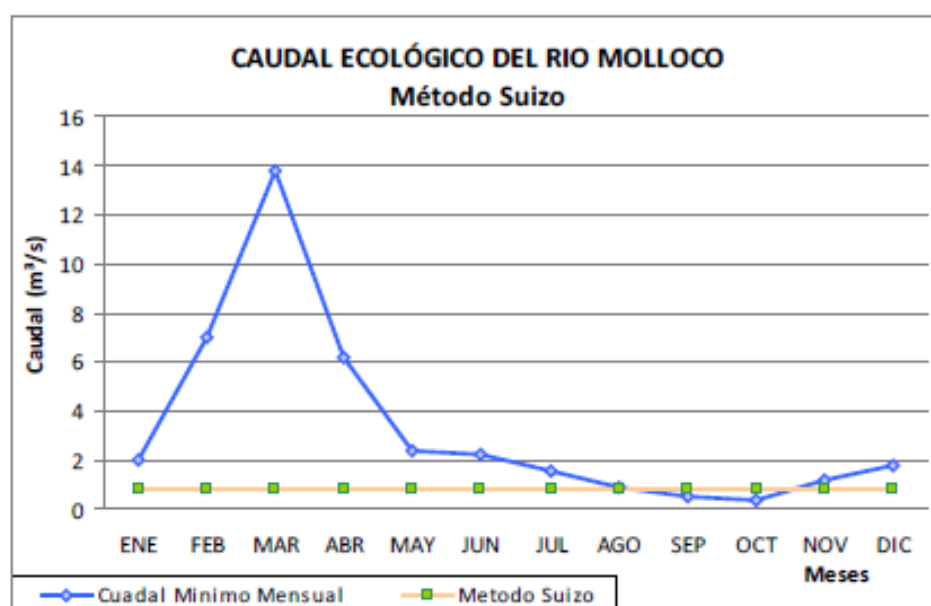


Figura 5. Caudal ecológico: Método Suizo

Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se usó el canal artificial ya construido, y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de 0,823 m³/s, luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad; los resultados de las mediciones se ven en la Tabla 9.

Método Asturiano

El caudal ecológico mínimo se calcula a partir del Q_{ps}, obtenido mediante la fórmula aceptada por la legislación suiza antes mencionada. Para el nivel de protección, el caudal ecológico mínimo será el mayor de los valores obtenidos de las siguientes fórmulas:

$$> Q_{ECO} = 50 \text{ l/s} \quad (1)$$

$$> Q_{ECO} = 0,35 * Q_{ps} \quad (2)$$

$$> Q_{ECO} = (15 * Q_{ps}) / (\ln Q_{ps})^2 \quad (3)$$

$$> Q_{ECO} = 0,25 * Q_{ps} + 75 \text{ l/s} \quad (4)$$

En este caso, con un $Q_{ps} = 2313 \text{ l/s}$, obtenemos los siguientes resultados:

$$Q_{ECO} = 50 \text{ l/s} \quad (1)$$

$$Q_{ECO} = 810 \text{ l/s} \quad (2)$$

$$Q_{ECO} = 578,2 \text{ l/s} \quad (3)$$

$$Q_{ECO} = 653,3 \text{ l/s} \quad (4)$$

Por lo tanto, $Q_E = 0,810 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Figura 6, se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método Asturiano, cuyo resultado es $0,810 \text{ m}^3/\text{s}$.

Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se usó el canal artificial ya construido, y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de $0,810 \text{ m}^3/\text{s}$, luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad; los resultados de las mediciones se ven en la Tabla 10.

Tabla 9. Resultados de las mediciones con el Método Suizo

Indicadores	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	8	<10	SI
Oxígeno Disuelto	mg/L	7	>5	SI
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	35	25-100	SI
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	7,5	6,5-8,5	SI

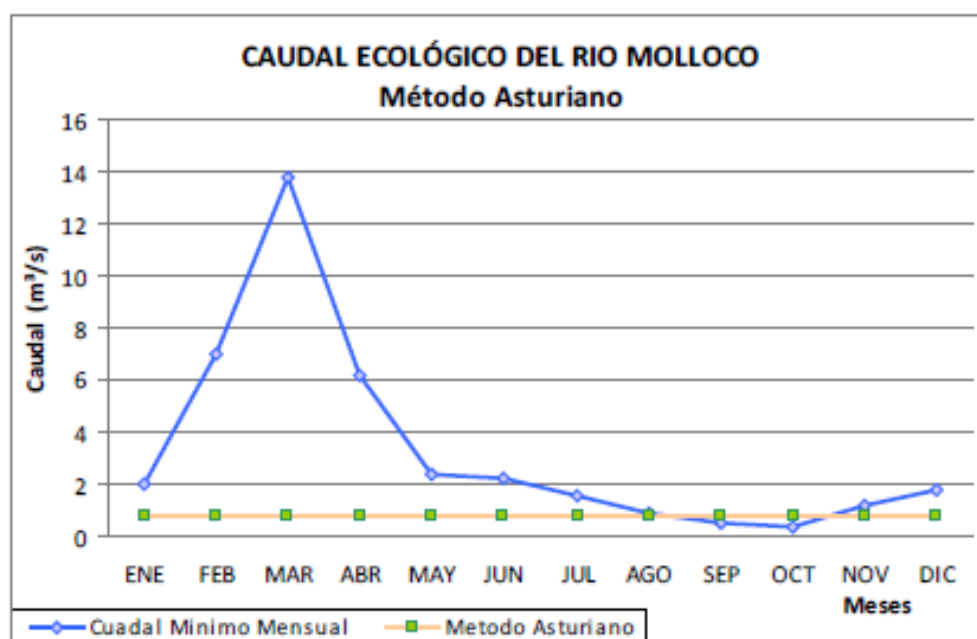


Figura 6. Caudal ecológico: Método Asturiano

Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico

Tabla 10. Resultados de las mediciones con el método de Asturiano

Indicadores	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	9	<10	SI
Oxígeno Disuelto	mg/L	8	>5	SI
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	30	25-100	SI
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	7,2	6,5-8,5	SI

3. Resultados y discusión

Debido al alcance del estudio que constituye una primera aproximación de caudal ecológico, para la determinación de los caudales ecológicos se adopta el promedio entre el valor del caudal ecológico obtenido por el método suizo y el método asturiano. Para complementar esta evaluación se recomienda desarrollar programas de monitoreo que permitan completar por lo menos los ciclos hidrológicos característicos. De la [Tabla 11](#), se obtiene el caudal ecológico mínimo de $0,8165 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con respecto al Método Ecuatoriano; podemos observar en la [Tabla 11](#), que no todos los indicadores de calidad de agua han cumplido las exigencias normativas, por lo que no es recomendable usar dicho caudal ($0,6425 \text{ m}^3/\text{s}$) ya que pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica, así como la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al Método Escocés; podemos observar en la [Tabla 11](#), que no todos los indicadores de calidad de agua han cumplido las exigencias normativas, por lo que no es recomendable usar dicho caudal ($0,1390 \text{ m}^3/\text{s}$) ya que pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica, así como la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al Método Suizo; podemos observar en la [Tabla 11](#), que todos los indicadores de calidad de agua han cumplido

las exigencias normativas, por lo que sí es recomendable usar dicho caudal ($0,8230 \text{ m}^3/\text{s}$) ya que no pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica; preservando la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al Método Asturiano; podemos observar en la [Tabla 11](#), que todos los indicadores de calidad de agua han cumplido las exigencias normativas, por lo que sí es recomendable usar dicho caudal ($0,8100 \text{ m}^3/\text{s}$) ya que no pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica; preservando la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al caudal mínimo recomendado ($0,8165 \text{ m}^3/\text{s}$), podemos observar en la [Tabla 11](#), que dicho caudal se obtiene de promediar los caudales de los métodos que si cumplen las normas establecidas, es decir con el Método Suizo y el Método Asturiano; descartando los primeros dos Métodos (Ecuatoriano y Escocés) debido a que sus indicadores de calidad del agua no están en el rango establecido por las normas.

Finalmente, esta metodología difiere de lo planteado por Peredo-Parada *et al.* (2014), ya que en los ríos costeros del Perú el caudal es bajo, esto debido a que la mayor cantidad de agua que cae en la sierra de nuestro país se va hacia la selva, desembocando finalmente en el océano atlántico.

Tabla 11. Resumen de los métodos aplicados – fuente propia

N°	Métodos	Caudal Ecológico (m ³ /s)	¿Es aplicable en el Perú?	Observaciones
1	Ecuatoriano	0,6425	NO	NO cumple las normas vigentes
2	Escocés	0,1390	NO	NO cumple las normas vigentes
3	Suizo	0,8230	SI	SI cumple las normas vigentes
4	Asturiano	0,8100	SI	SI cumple las normas vigentes
	Promedio (3 y 4)	0,8165		

4. Conclusiones

La metodología propuesta en este trabajo es aplicable sólo a los ríos costeros de nuestro país, en los cuales se tienen serias limitaciones en las épocas de estiaje. Los métodos hidrológicos e hidráulicos no consideran parámetros biológicos; tienen pocos antecedentes sobre requerimientos ambientales y requieren levantamiento de línea de base de alto costo. Las razones por las cuales se escogieron a los métodos Suizo y Asturiano son por que más se acercan a nuestra realidad debido a que consideran los aspectos ecológicos y medio ambientales. El monitoreo de los parámetros ambientales de los ríos requiere de una cuidadosa evaluación sobre donde recolectar las muestras aguas arriba y aguas debajo de la captación y de la descarga de la central hidroeléctrica, respectivamente.

5. Agradecimientos

A mis profesores de pre-grado y post-grado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

6. Literatura citada

- Baeza, D.; Vizcaino, P. 2008. Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía: uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.
- García de Jalón, D. 1998. El régimen ecológico de caudales: bases y criterios para su aplicación en los ríos

españoles.

- Jamett, G.; Rodrigues, A. 2010. Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil.
- Marraco, G.; Hillman, G.; Cabildo, D.; Pagot, M.; Pozzi, C.; Plencovich, G.; Juncos, R.; Rodríguez, A.; Farias, H. 2012. Estudio de caudal ecológico para el sistema del río dulce y sus humedales.
- Meza, D.; Martínez, L.; Mercado, N.; García, D.; Gonzales, M.; Marchamalo, M.; De la Mora, C. 2017. Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de México. ISSN 0718-560X
- Palomino, P. 2016. Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca.
- Peredo-Parada, M.; Salcedo, G.; Quevedo, D. 2014. Determinación del caudal ecológico mediante el método caudal básico de mantenimiento en el río Bureo.
- Scotta, E. 2014. Cálculo para el paso del caudal ecológico en la Central Hidroeléctrica del Río Picoiquén, Italia.

ANEXO 3

Anexo 3: Segundo artículo indexado a una revista científica relacionado a la tesis

ISBN: 978-628-95207-8-1. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1126

Stochastic Analysis of the Flow of the Vilcanota River in the Machupicchu Hydroelectric Power Plant using ARIMA models 2023.

Margarita Chevarria Moscoso¹, Josue Eliezer Alata Rey¹, Jorge Bojórquez Segura², José Serna-Landivar³

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, mchevarria@lamolina.edu.pe, josue@lamolina.edu.pe.

²Universidad Privada del Norte SAC, Perú, bojorquez.ja@gmail.com.

³Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe.

Abstract— The constant demand for energy consumption suggests that its supply be duly attended to for the economic and social development of the country. Since fossil fuels generate a large amount of carbon emissions and are also being depleted; The change towards renewable energies is essential.

However, the creation and commissioning of clean energy plants is a crucial challenge because it is difficult to obtain natural resources for continuous energy generation. Consequently, a forecast model is an important tool to anticipate energy generation, consumption and reserve. This document presents a flow forecasting model for hydroelectric energy production, using the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model. The data involved was obtained from the Machupicchu Hydroelectric Power Plant.

Although the energy capacity of the hydroelectric plant is greatly affected by environmental variability, having a forecast model and a long-term plan that will greatly benefit the production of renewable energy to meet the continuous increase in the demand.

Keywords— ARIMA, Machupicchu Hydroelectric Power Plant, flow of the Vilcanota River.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Análisis Estocástico del Caudal del Río Vilcanota en la central Hidroeléctrica de Machupicchu mediante modelos ARIMA 2023

Margarita Chevarria Moscoso¹, Josue Eliezer Alata Rey¹, Jorge Bojórquez Segura², José Serna-Landivar³

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, mchevarria@lamolina.edu.pe, josue@lamolina.edu.pe.

²Universidad Privada del Norte SAC, Perú, bojorquez.ja@gmail.com.

³Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe.

Resumen- La constante demanda de consumo de energía, sugiere que su abastecimiento sea atendido debidamente, para el desarrollo económico y social del país. Dado que los combustibles fósiles generan una gran cantidad de emisiones de carbono y además se están agotando; el cambio hacia energías renovables es fundamental.

No obstante, la creación y puesta en marcha de plantas de energía limpia es un desafío crucial debido a que es difícil conseguir recursos naturales para la generación de energía de manera continua. En consecuencia, un modelo de pronóstico es una herramienta importante para anticipar la generación, el consumo y la reserva de energía. En este documento se presenta un modelo de pronóstico del caudal para la producción de energía hidroeléctrica, mediante el modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA). Los datos involucrados se obtuvieron de la central Hidroeléctrica de Machupicchu.

A pesar de que la capacidad de energía de la central hidroeléctrica se ve sumamente afectada por la variabilidad ambiental, disponer de un modelo de pronóstico y un plan a largo plazo que beneficiará en gran medida la producción de energía renovable para atender el continuo aumento de la demanda.

Palabras clave: ARIMA, Central Hidroeléctrica de Machupicchu, caudal del río Vilcanota.

I. INTRODUCCIÓN

El empleo de energías renovables resulta esencial para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, con el propósito de prevenir el cambio climático. La energía hidroeléctrica es, en la actualidad, la principal fuente renovable que contribuye al suministro de electricidad y se prevé que su contribución aumente significativamente. No obstante, la energía hidroeléctrica es una de las fuentes de energía con mayor probabilidad de verse afectadas por las condiciones ambientales y la variabilidad climática, ya que la cantidad de electricidad generada está íntimamente vinculada con la cantidad de agua [1]–[4]. Para mantener una generación de energía sostenible y suficiente, es importante realizar una gestión eficiente de las centrales hidroeléctricas, así como realizar una eficaz planificación energética a corto y largo plazo [5][6].

La predicción de caudal es importante para la generación de energía, uno de los métodos más relevantes y eficientes

para la predicción del caudal es la metodología ARIMA. La investigación [7] que estudió los caudales de la “Presa Three Georges” para la planificación y gestión eficiente de los recursos hídricos utilizando la metodología ARIMA. De manera similar [8], [9], realizaron estudios de predicción del caudal.

La Central Hidroeléctrica de Machupicchu es una de las centrales de generación hidroeléctrica más importante del sur del Perú, esta se encuentra ubicada en la provincia de Urubamba del departamento del Cusco y utiliza los recursos hídricos que el río Vilcanota le proporciona. El río Vilcanota nace en la cordillera del Nudo del Vilcanota y discurre a través de todo el valle Sur de Cusco, para luego discurrir por el Valle Sagrado de los Incas e internándose hacia la ceja de selva llegando al distrito de Machupicchu [10]. (Ver fig. 1).



Fig. 1. Río Vilcanota. C. H. de Machupicchu [10].

En el 2001 su operación contaba con tres grupos Pelton de 30 MW cada uno; totalizando 90 MW. En el 2015, el COES aprueba la Puesta en Operación del Grupo N° 04 de la II fase de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, de una potencia instalada de 102 MW, con lo que la potencia instalada de la central se habría incrementado hasta 192 MW como podemos observar en la tabla I.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE LA C. H. DE MACHUPICCHU [10].

Cantidad	Unidades Generadoras	Potencia Instalada	Caida Neta	Caudal de Diseño
3	Turbinas Pelton	90 MW (3*30MW)	345 m	30 m ³ /s
1	Francis Vertical	102 MW	345 m	32 m ³ /s

La central hidroeléctrica de Machupicchu (ver Fig.2), abastece de energía eléctrica a los departamentos de Cusco, Puno y Apurímac; además se consolida como un importante

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

polo energético que podría crecer en un futuro cercano con la instalación de la central hidroeléctrica de Santa Teresa II. El mejoramiento de la generación eléctrica en la central hidroeléctrica de Machupicchu y la evaluación del comportamiento de la cuenca del río Vilcanota es de suma importancia, debido a que los caudales naturales aforados son muy variables, pues históricamente en época de estiaje, el caudal es de 30 m³/s, mientras que la central hidroeléctrica demanda 62 m³/s. (ver Fig. 3).



Fig. 2. C. H. de Machupicchu [10].



Fig. 3. Descarga del río Vilcanota [10].

La finalidad de esta investigación es la modelización y predicción del caudal del río Vilcanota que llega a la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, mediante análisis cuantitativo ARIMA de Series Temporales en resolución mensual, el cual nos permitirá conocer el comportamiento de sus caudales en un horizonte predictivo de no menor de 2 años; así como sugerir y prever el suministro de caudales provenientes de otros embalses en la época de estiaje a fin de garantizar la disponibilidad operativa de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu.

II. METODOLOGIA

2.1. Especificación del modelo

Los Modelos ARIMA son modelos paramétricos que representan la serie de variables aleatorias y se analizan en función de la interrelación temporal de sus elementos [11]. Box-Jenkins son los autores de la modelización ARIMA y ellos recomiendan al menos 50 datos y así poder determinar el modelo ARIMA adecuado [12], [13].

Se dice que un proceso es estocástico no estacionario cuando al diferenciar el proceso original, el proceso transformado resultante es estacionario y el número de veces

que debe diferenciarse el proceso original para transformarse en estacionario constituye el grado de orden de homogeneidad.

A un proceso integrado X_t se le denomina proceso autorregresivo de medias móviles integrado, ARIMA (p,d,q), si tomando diferencias de orden d se obtiene un proceso estacionario Z_t . El modelo ARIMA se expresa de la siguiente forma [14]:

$$Z_t = \phi_1 Z_t + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \delta + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (1)$$

Abreviadamente se tiene:

$$\phi(L)Z_t = \delta + \theta(L)u_t \text{ siendo } Z_t = \Delta^d X_t = (1-L)^d X_t$$

Quedando:

$$\phi(L)(1-L)^d X_t = \delta + \theta(L)u_t \quad (2)$$

Donde:

$\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q$: Son los coeficientes

Z_t : Es la variable

Z_{t-p} : Los datos previos a la etapa

Se puede observar que existe una tendencia en la varianza, esto es, que la dispersión de las observaciones no es constante a lo largo del tiempo. Cuando se presenta este hecho la transformación adecuada puede consistir en tomar logaritmos neperianos [14]:

$$\phi(L)\Delta^d X_t^{\lambda} = \delta + \theta(L)u_t \quad (3)$$

$$\phi(L)(1-L)^d (X_t^{\lambda} - u) = \theta(L)u_t \quad (4)$$

Otra fuente de no estacionariedad en muchas de las series reales del ámbito energético lo constituye la estacionalidad. Para desestacionalizar las series se procede a la diferenciación estacional. Los modelos estacionales no estacionarios pero homogéneos, ARIMA(P,D,Q).

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-s} + \phi_2 Z_{t-2s} + \dots + \phi_p Z_{t-ps} + \delta + u_t - \theta_1 u_{t-s} - \dots - \theta_q u_{t-qs} \quad (5)$$

$$Z_t = \Delta_s^D X_t = (1-L^s)^D X_t \quad (6)$$

Abreviadamente se tiene:

$$\Phi_p(L^s)(1-L^s)^D X_t = \delta + \Theta_q(L^s)u_t \quad (7)$$

2.2. Procedimiento para la elaboración de un modelo ARIMA

Para identificar el modelo adecuado se debe cumplir con las siguientes etapas (ver fig.4).

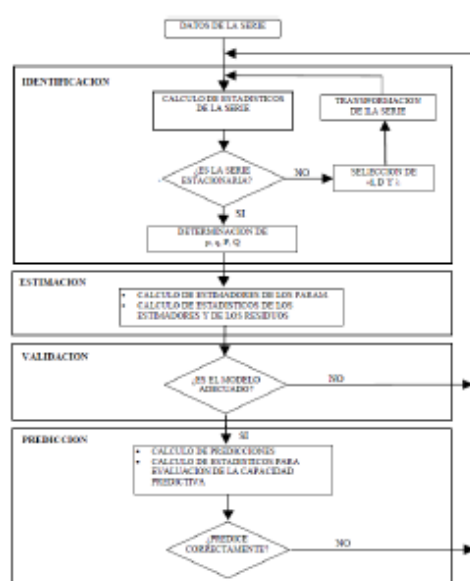


Fig. 4. Esquema de análisis de modelos ARIMA [14].

2.3. Tratamiento de la información de entrada

La variable de estudio Caudal está representada por la serie de caudales tomados en la bocatoma de la Central Hidroeléctrica de Machupichu en valores mensuales en m^3/s .

2.3.1. Tamaño y característica de la muestra

De acuerdo a la información obtenida de los caudales naturalizados desde el año 2015 al 2023 [10], se tienen un total de 108 observaciones cuyo comportamiento se muestra a continuación (Ver fig.5).

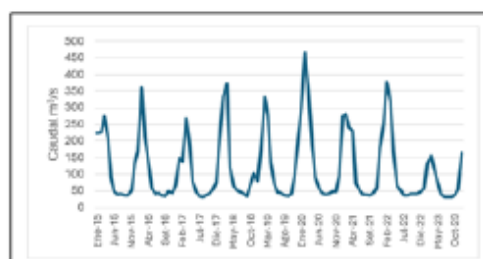


Fig. 5. Serie temporal de caudales del 2015 al 2023

2.3.2. Estadísticos descriptivos del Caudal

Podemos observar el caudal máximo y mínimo que se dan entre los años del 2015-2023 en la tabla 2.

TABLA II
CAUDAL MÁXIMO Y MÍNIMO.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Caudal	108	30.25	465.8	115.7731	102.84396

La serie caudal, de acuerdo con los registros obtenidos no presenta una tendencia marcada, pero sin variaciones estacionales mensuales. La serie muestra un marcado patrón estacional, ya que los caudales alcanzan su punto máximo en los meses de noviembre de un año a mayo del año siguiente. Mientras que los caudales menores ocurren en los meses de junio a octubre. Se puede decir que la serie exhibe un comportamiento periódico con un periodo de 12 meses. También, se caracteriza por ser una serie no estacionaria y se sabe que el modelo ARIMA requiere que la serie sea estacionaria en varianza y en media regular y estacional.

2.3.3. Análisis de estabilidad de la varianza de la serie

Para analizar la estabilidad de las varianzas de la serie Caudal se utiliza el Test de Levene. Esta prueba consiste en evaluar la posible igualdad o desigualdad de las varianzas de la serie. Para determinarla se prueba la Hipótesis Nula de que las varianzas sean iguales.

La significancia (p valor) Sig=0.032 es menor de 0.05, por lo tanto, no existe homogeneidad de varianzas. El estadístico de Levene indica que la serie no es estacionaria en varianza, se puede observar en la tabla 3.

TABLA III
PRUEBA DE HOMOGENEIDAD EN VARIANZA

Prueba de Homogeneidad de Varianza					
		Estadístico de Levene	g(1)	g(2)	Sig.
Caudal	Se basa en la media	2.227	8	99	0.032
	Se basa en la mediana	0.517	8	99	0.841
	Se basa en la media y con g ajustado	0.517	8	73.164	0.84
	Se basa en la media recortada	1.783	8	99	0.089

2.3.4. Componente estacional y cíclico de la serie original

La estacionalidad de la serie la podemos analizar mediante el periodograma por frecuencia de la serie temporal, a cada amplitud le corresponde una frecuencia cuya inversa es el periodo estacional o cíclico [15].

El valor más alto de 0.08 de frecuencia, de acuerdo con el periodograma de Frecuencia se observa una fuerte variación estacional cada 12 meses que corresponde a un periodo de un

año o cada 12 meses. Frecuencia: $0,080 \quad 1/0,080 = 12$ meses (ver fig.6).

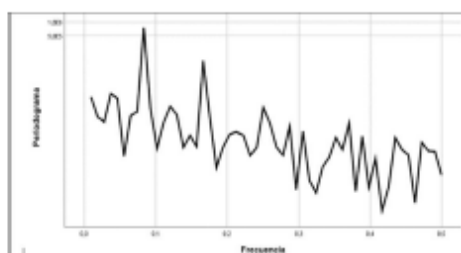


Fig. 6. Periodograma de frecuencia de la serie temporal de caudal.

2.3.5. Prueba de Levene

La prueba de Levene, que es una prueba que permite comprobar la hipótesis de que los grupos anuales de datos mensuales formados proceden de poblaciones con varianza común. En esta situación existe una familia de transformaciones de Box-Cox, que puede estabilizar la varianza, y es dado por:

$$\text{Transformación de } X_i: \begin{cases} X_i^{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln(X_i), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (8)$$

El poder de transformación es igual a uno menos la pendiente de la recta de regresión mínimo-cuadrática ajustada a los puntos generados de la gráfica de dispersión vs. nivel. Debe tenerse en cuenta que esta familia de transformaciones no solo permite estabilizar las varianzas, sino que además puede proporcionar normalidad. Así, la prueba de Levene permitirá contrastar la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas entre las varianzas de la serie caudales en los grupos anuales conformados. Con el programa SPSS se realiza esta prueba estimando el poder de transformación λ mediante el comando exploración dispersión nivel con test de Levene. Dado que la potencia de transformación estimada se obtiene restando a uno el valor de la pendiente de la recta de regresión: $\lambda = 1 - 1.273 = -0.272$ (ver fig. 7).

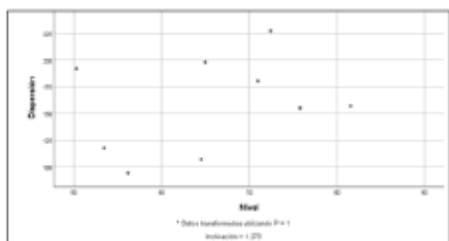


Fig. 7. Gráfico de dispersión vs Nivel de caudal por año.

Se sabe que es habitual utilizar potencias redondeadas a múltiplos de 0.5. Dado que la potencia de transformación estimada es de -0.272, de las potencias posibles que lograrán la estabilización en varianza de la serie original Caudal, serían $\lambda=0$ ó $\lambda=-0.5$, se recomienda un $\lambda=0$ equivale a una transformación de logaritmo natural, y será la transformación que efectuaremos para estabilizar las varianzas de la serie temporal Caudal.

2.4. Evaluación

Para poder lograr estabilidad en media regular y media estacional debemos de encontrar los valores adecuados de las diferenciaciones "d" y "D" de la serie. Generalmente los valores de d y D se encuentran entre 0, 1 ó 2. A partir de la serie Caudal transformada (LnCaudal), se analizó su correspondiente función de autocorrelación simple ACF (ver fig. 8), se observa que tiene un decaimiento rápido en los primeros retardos, por lo que se deduce que la serie no presenta una tendencia marcada.

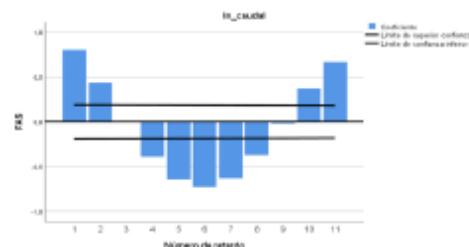


Fig. 8. Gráfico de autocorrelaciones simple para la serie.

Con respecto a la estacionalidad de la serie LnCaudal, se evaluó la correspondiente función de autocorrelación simple ACF con más retardos (ver Fig. 9), se visualiza que cada 12 periodos la autocorrelación vuelve a predominar, por lo que se deduce que la serie presenta estacionalidad, por lo tanto, la serie será diferenciada estacionalmente.

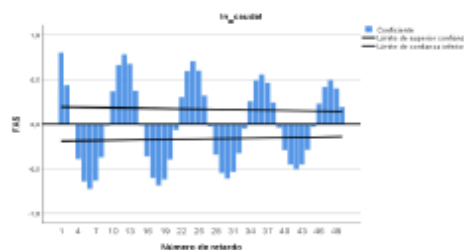


Fig. 9. Gráfico de autocorrelaciones simple para la serie LnCaudal con más retardos.

2.4.1. Determinación de órdenes autorregresivos y medias móviles.

Para analizar la parte regular de la serie (ver fig.10), se muestran las autocorrelaciones estimadas ACF de la serie LnCaudal con $d=0$ y $D=1$, y la figura 11 muestra las correspondientes autocorrelaciones parciales estimadas ACFP. A partir de la función de autocorrelación de la serie, se observa que las autocorrelaciones caen aproximadamente exponencialmente (rápidamente), y en la función de autocorrelación parcial, se ve que después del retardo 1 las correlaciones parciales disminuyen con bastante regularidad, estas características son de un modelo autorregresivo, esto sugiere que esta serie temporal podría describirse sólo mediante un modelo AR(1), por lo tanto, una alternativa para la parte regular de la serie será un modelo de la forma ARMA(1,0) con $p=1$ y $q=0$. Para analizar la parte estacional de la serie, también se emplean autocorrelaciones estimadas ACF y autocorrelaciones parciales estimadas ACFP, de la serie LnCaudal con $d=0$ y $D=1$, vistas en la figura 10 y figura 11. Analizando los rezagos estacionales, en la función de autocorrelación de la serie, se puede observar que hay un decaimiento de las correlaciones de los rezagos estacionales, y en la función de autocorrelación parcial, se ve que después del primer rezago estacional (periodo 12) la autocorrelación parciales estacionales (24, 36, ...) son pequeñas, esto sugiere que la serie se puede describir mediante un modelo estacional AR(1)s, por lo tanto, una alternativa para la parte estacional de la serie será un modelo de la forma ARMA(1,0)s con $P=1$ y $Q=0$. Luego, el modelo obtenido es de la forma ARIMA (1,0,0)x(0,1,1)s. Se propuso además el modelo ARIMA (1,0,1)x(0,1,1)s. Estos modelos serán sometidos a análisis para primero ver si sus parámetros son significativos y evaluar las pruebas de residuos, escogiendo el modelo que consiga el mejor ajuste.

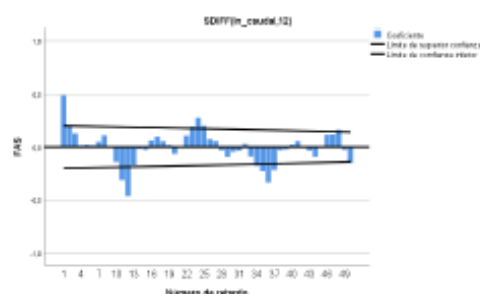


Fig. 10. Gráfico de autocorrelaciones simple para la serie LnCaudal con $d=0$ y $D=1$

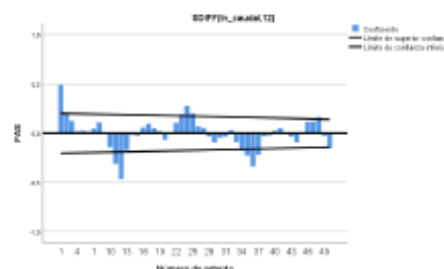


Fig. 11. Gráfica de autocorrelaciones Parciales para la serie LnCaudal con $d=0$ y $D=1$.

Teniendo en cuenta las características de la serie, su transformación de logaritmo natural, sus características de estacionalidad y tendencia proponemos evaluar los siguientes modelos ARIMA como se puede observar en la tabla 4.

TABLA IV
MODELOS ARIMA IDENTIFICADOS

Modelo	Tipo de transformación	Orden regular d	Orden Estacional D	Modelo ARIMA	Condición
M1	Logaritmo natural del caudal	0	1	(1,0,0)x(1,1,0)	Tentativo
M2	Logaritmo natural del caudal	0	1	(1,0,1)x(1,1,0)	Alternativo

III. RESULTADOS

3.1. Estimación de parámetros.

Un indicativo del grado de ajuste del modelo ARIMA a los datos es la raíz cuadrada de las varianzas de los residuales, cuando menor sea este valor será mejor el ajuste de los datos de la serie temporal al modelo. Los modelos identificados; ARIMA (1,0,0)x(0,1,1)s y ARIMA (1,0,0)x(1,1,1)s serán analizados, utilizando el programa SPSS, que nos permite verificar la significancia de sus parámetros, así como efectuar las pruebas de residuos como se puede ver en la tabla 5.

TABLA V
MODELOS ARIMA OPTIMO.

Modelo	Modelo ARIMA	Contraste de Significancia de parámetros	Evaluación
M1	(1,0,0)x(1,1,0)	Coefficientes estables y significativos	Óptimo
M2	(1,0,1)x(1,1,0)	Coefficientes estables y significativos	

3.2. Resultados de las estimaciones de modelos ARIMA representativos.

Las estimaciones y ajuste, calculados con el Programa SPSS, de los coeficientes autorregresivos y medias móviles regulares y estacionales se muestran a continuación para cada modelo:
Modelo (M1) ARIMA (1,0,0) x (1,1,0) de la serie LnCaudal. En la tabla 6, se muestra las estimaciones de los parámetros

del primer modelo ARIMA (1,0,0) x (1,1,0) s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que los parámetros autorregresivos AR tanto de la parte regular como de la parte estacional son significativos (con Sig.=0.000 < 0.05).

TABLA VI
ESTIMACIONES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO (M1) ARIMA (1,0,0) x (1,1,0)s DE LA SERIE LNCAUDAL.

			Estimación	SE	t	Sig.
Modelo 1	Caudal	Logaritmo Natural				
		Constante	-0.022	0.041	-0.55	0.584
		AR				
		Retardo1	0.511	0.09	5.696	0.0
		AR, estacional				
		Retardo1	-0.597	0.089	-6.683	0.0
		Diferencia				
			1			

Luego este modelo M1 tiene la siguiente estructura:
ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s para LnCaudal.

$$(1 - \phi L)(1 - \Phi L^{12})(1 - L^{12})LnCaudal = \theta_0 + a_t \quad (8)$$

$$(1 - 0.511L)(1 + 0.597L^{12})(1 - L^{12})LnCaudal = a_t \quad (9)$$

$$\text{Donde } \phi = 0.511 \quad \Phi = -0.597 \quad \theta_0 = -0.022$$

En la tabla 7, se muestra las estimaciones de los parámetros del primer modelo ARIMA (1,0,1) x (1,1,0)s, con sus respectivos errores estándar y significancia. Se puede observar que los parámetros autorregresivos AR tanto de la parte regular como de la parte estacional son significativos (con Sig.=0.000 < 0.05), pero el parámetro MA de la parte regular no es significativo (Sig.=0.5872 > 0.05).

TABLA VII
ESTIMACIONES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO (M2) ARIMA (1,0,1)x(1,1,0)s DE LA SERIE LNCAUDAL.

				Estimación	SE	t	Sig.
Modelo 2	Caudal	Logaritmo Natural	Constante	-0.022	0.043	-0.513	0.609
			AR				
			Retardo1	0.593	0.166	3.568	0.001
			MA				
			Retardo1	-0.114	0.206	0.552	0.6
			AR, estacional				
			Retardo1	-0.604	0.09	-6.714	0.0
		Diferencia Estacional	1				

Luego este modelo M2 tiene la siguiente estructura:
ARIMA (1,0,1)x(1,1,0)s para LnCaudal.

$$(1 - \phi L)(1 - \Phi L^{12})(1 - L^{12})LnCaudal = \theta_0 + (1 - \theta L)a_t \quad (9)$$

$$(1 - 0.593L)(1 - 0.604L^{12})(1 - L^{12})LnCaudal = (1 - 0.114L)a_t \quad (10)$$

$$\text{Donde } \phi = 0.593 \quad \Phi = -0.604 \quad \theta_0 = 0$$

En la tabla 8 se resume los modelos ajustados incluyendo el indicador BIC para evaluar los modelos M1 y M2.

TABLA VIII
MODELOS ARIMA

Modelo	Modelo ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)	Ecuación del Modelo	BIC
M1	(1,0,0)x(1,1,0)	$(1 - 0.511L)(1 + 0.597L^{12})(1 - L^{12})LnCaudal = a_t$	8.021
M2	(1,0,1)x(1,1,0)	$(1 - 0.593L)(1 - 0.604L^{12})(1 - L^{12})LnCaudal = (1 - 0.114L)a_t$	8.044

3.3. Validación del modelo ARIMA optimo

La validación de los mejores modelos ARIMA calculados y seleccionados consiste en comprobar si satisface la hipótesis relativa de que los residuos del modelo (a_t), obedecen al comportamiento de ruido blanco. Si X_t en la serie en estudio y $\hat{X}_t$ es su estimación mediante modelo ajustado, una estimación de la realización de ruido blanco será el resultado de $\hat{a}_t = X_t - \hat{X}_t$ [8].

En el programa SPSS, las estimaciones de los valores de la serie temporal Caudales mediante modelo ARIMA elegido, conforman una serie denominada FIT acompañada de la serie residual ERR.

$$ERR = X_t - FIT$$

Por lo tanto, la validación consistirá en comprobar que la serie ERR cumple:

- Tiene media cero
- Es estable en varianza:
- En lo que se refiere a la estabilidad en varianza de ERR, es consecuencia de la estabilidad en varianza de la serie original Caudal, realizada en la etapa de identificación del modelo.
- Las observaciones están incorrelacionadas.
- Procede de una distribución normal.

Se debe de comprobar la idoneidad del ajuste del modelo examinado y los residuos del modelo ajustado.

3.4. Prueba de incorrelación de residuos

Para efectuar una verificación que los residuos están incorrelacionados, se utiliza el gráfico de la función de autocorrelación simple de dichos residuos, si todos los coeficientes de la ACF se encuentran dentro de la banda de confianza al 95% tendiendo a cero.

En las siguientes figuras se presentan las salidas del SPSS, en la figura 12 se muestra los residuos del modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s, se puede notar que tiene un comportamiento alrededor de cero y mostrando una aleatoriedad. En la figura 13 se observa que las autocorrelaciones residuales no presentan evidencia de falta de ajuste, ya que ninguno de los valores queda fuera de las bandas de confianza del 95%. En la figura 14 se muestra las autocorrelaciones con la estadística de Q de Box-Ljung, y se presenta que todos los valores pasan la prueba de que los residuos son incorrelacionados. Por lo tanto, ante estas evidencias se puede concluir para el modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s que los residuos tienen media cero y son incorrelacionados, esto es los residuos son un ruido blanco.

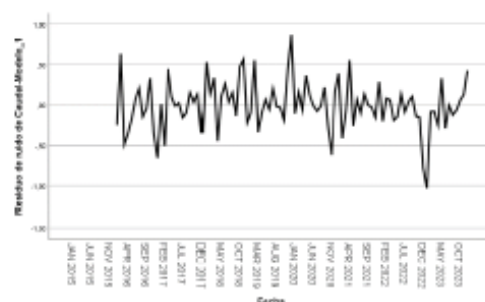


Fig. 12. Gráfico de residuos del modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s

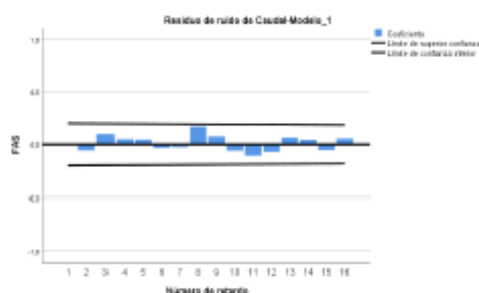


Fig. 13. Gráfico de autocorrelaciones de los residuos del modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0) x (1,1,0)s

En la tabla 9, se puede observar las autocorrelaciones simples y la estadística de Q de BOX-Ljung.

TABLA IX
AUTOCORRELACIONES SIMPLES Y LA ESTADÍSTICA DE Q DE BOX-LJUNG

Serie: Residuo de Ruido de Caudal-Modelo_1					
Retardo	Autocorrelación	Desv. Error ^a	Estadístico de Box-Ljung		
			Valor	gl	Sig. B
1	-0.002	0.100	0.000	1	0.985
2	-0.056	0.100	0.317	2	0.853
3	0.097	0.099	1.275	3	0.735
4	0.049	0.099	1.521	4	0.823
5	0.046	0.098	1.736	5	0.884
6	-0.034	0.098	1.855	6	0.933
7	-0.024	0.097	1.917	7	0.964
8	0.170	0.097	5.016	8	0.756
9	0.076	0.096	5.638	9	0.776
10	-0.060	0.096	6.025	10	0.813
11	-0.108	0.095	7.312	11	0.773
12	-0.072	0.094	7.894	12	0.793
13	0.063	0.094	8.341	13	0.821
14	0.044	0.093	8.558	14	0.858
15	-0.053	0.093	8.886	15	0.883
16	-0.054	0.092	9.233	16	0.904

3.5. Prueba de normalidad de residuos

Es una prueba que permite contrastar la hipótesis nula de distribución normal es la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, donde si el p-valor asociado al valor del estadístico de contraste es menor que α , se rechazara la hipótesis nula al nivel de significancia α (0.05). La salida en SPSS mostrada en la tabla 10, de esta prueba para contrastar la hipótesis nula de normalidad de la serie residual del modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0) x (1,1,0)s, se da a continuación.

TABLA X
PRUEBA DE NORMALIDAD PARA LOS RESIDUOS DEL MODELO M1 AJUSTADO ARIMA (1,0,0) x (1,1,0)s.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Residuo de Ruido de Caudal-Modelo_1	0.000	1	0.985	0.000	1	0.985

a. Corrección de Significación de Lilliefors

De ello se observa que el p-valor ($\text{Sig.}=0.085>0.05$) asociado al estadístico de contraste es grande; por tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula de distribución normal. También en la figura 14, se muestra el Gráfico Q-Q normal de los residuos del modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s, se observa que casi los todos puntos están sobre la recta, es evidencia que los residuos presentan una distribución normal.

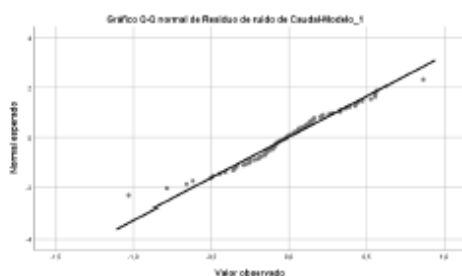


Fig. 14. Gráfico Q-Q normal de los residuos del modelo M1 ajustado ARIMA (1,0,0) x (1,1,0)s.

Luego, al analizar el modelo M1 propuesto ARIMA (1,0,0) x (1,1,0)s de la serie LnCaudal, se comprobó la idoneidad del ajuste del modelo examinando los residuos del modelo ajustado. Esto comprobó que los residuos están incorrelacionados y proceden de una distribución normal. Por lo tanto, este modelo M1 propuesto será utilizado con fines de pronóstico.

3.5.1. Prueba de normalidad de residuos

Cálculo de Predicciones ARIMA

El cálculo de las predicciones de la serie temporal Caudal, utilizando modelos ARIMA, se realiza a partir de las expresiones matemáticas obtenidas en el proceso de estimación y ajuste, hemos seleccionado el modelo M1, cuyos coeficientes son significativos y es un buen modelo predictivo, la ecuación tiene la siguiente forma.

El modelo M1 tiene la siguiente estructura:

ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s para LnCaudal. Y utiliza la ecuación 9 y se asume que $Z_t = L_{\text{Caudal}}$. La ecuación obtenida para nuestro modelo es:

$$\hat{z}_t = 0.511\hat{z}_{t-1} + 0.403\hat{z}_{t-12} - 0.206\hat{z}_{t-13} + 0.597\hat{z}_{t-14} - 0.305\hat{z}_{t-15} + a_t$$

Resultados predictivos

En nuestro caso se trata de 108 observaciones de la serie temporal caudal. Las predicciones deben ser procesos dinámicos que deben ser validados año a año, por lo que definimos que nuestro horizonte predicción será de dos años.

En la figura 15, se observa la capacidad predictiva del modelo ARIMA y coincidió con el modelo original (fig.5). La serie se ajusta al modelo M1. Donde Lncaudal es el logaritmo natural de la serie. LCL es el límite de confianza inferior y UCL es el límite de confianza superior. Se observa que las predicciones caen dentro del límite de confianza. Tanto en la zona de validación como la zona predictiva, lo cual justifica que nuestro modelo sea el mejor.

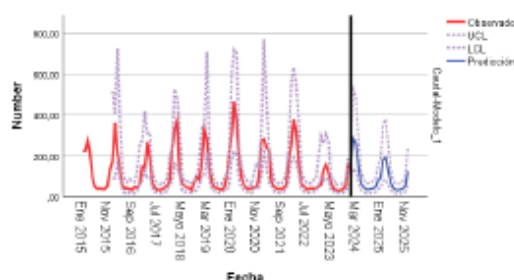


Fig. 15. Gráfico de caudal observado y ajustado.

3.5.2 Análisis comparativo con modelos determinístico de alisados exponenciales.

Los alisados exponenciales están definidos como métodos de predicciones incondicionales, autoproyectivos, basados en el enfoque determinista, adecuados para efectuar predicciones a corto plazo. El modelo a elegir será:

Modelo WINTERS. - Asume que la serie temporal tiene tendencia lineal y variación estacional multiplicativa.

El paquete estadístico SPSS nos permite efectuar el análisis de series temporales con modelos de suavizado exponencial, dándonos la posibilidad de escoger modelos; como el Winters Multiplicativo y Winters Aditivo.

Se seleccionará el modelo que presente el menor error estadístico MAPE (error porcentual absoluto medio). También se elegirán los parámetros: alfa, gamma y delta que correspondan al modelo seleccionado. A continuación, se muestran los indicadores estadísticos de los modelos predictivos analizados con el SPSS, se observa en la tabla XI.

TABLA XI
Resultado de los modelos predictivos determinísticos analizados

Indicadores Estadísticos	Aditivo de Winters	Multiplicativo de Winters
MAPE	27.76%	17.51%

El mejor modelo determinístico es el Suavizado exponencial Multiplicativo de Winters que muestra el menor error porcentual absoluto medio (MAPE) con el valor de 17.51%.

A continuación, en la tabla XII podemos observar los parámetros del modelo predictivo Multiplicativo de Winters

TABLA XII
Parámetros del modelo predictivo Multiplicativo de Winters

Modelo		Estimación	SE	t	Sig.
Caudal modelo	Alfa (nivel)	.320	0.053	6.023	.000
	Gamma (tendencia)	.000	0.020	0.010	.992
	Delta (estacionalidad)	.039	0.080	0.492	0.624

Así mismo se procedió a efectuar el pronóstico con el modelo multiplicativo de Winters hasta diciembre del año 2025, cuyo gráfico del comportamiento del caudal, se muestra en la siguiente figura 16.

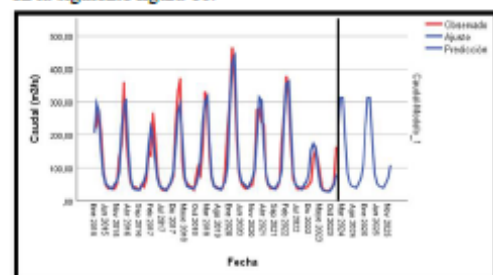


Fig. 166. Gráfico de la predicción al 2025 con Modelo Multiplicativo de Winters.

IV. CONCLUSIONES

1.- La serie temporal fue analizada para un periodo de 9 años desde enero del 2015 hasta diciembre del 2023, el cual hace un total de 108 meses. Se pudo observar que los datos son estacionarios en media, pero no en varianza.

2.-Al realizar el análisis mediante modelos ARIMA, se encontró que el mejor modelo de predicción es el ARIMA (1,0,0)x(1,1,0)s con transformación de la serie Caudal a logaritmo natural. Debido a que cumple con todas las exigencias de la etapa de validación además cuenta con un BIC igual 8.02.

3.- Los errores se encuentran incorrelados dentro de la banda de confianza al 95%, también pasan la prueba de normalidad de residuos y muestran los menores valores en la comparación por estadísticos de error.

4.- Los valores de las predicciones del comportamiento de la variable caudal, permiten predecir el comportamiento del río y planear acciones de tipo operativo para los años analizados 2024 y 2025.

5.- Al hacer una comparación entre el modelo de alisados exponenciales Winters y ARIMA. Observamos que la

predicción en ARIMA es más exacta y sus valores son más conservadores.

REFERENCIAS

- [1] G. Harrison and H. Whittington, *The Impact of Climatic Change on Hydropower Investment*. 2001.
- [2] C. Bello, W. Suarez, F. Drenkhan, and F. Vega-Jacome, "Hydrological impacts of dam regulation for hydropower production: The case of Lake Sibinacocha, Southern Peru," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 46, p. 101319, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101319>.
- [3] M. A. D. Larsen et al., "Challenges of data availability: Analysing the water-energy nexus in electricity generation," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 26, p. 100426, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100426>.
- [4] A. Bhaduri, C. Ringler, I. Dombrowski, R. Mohtar, and W. Scheumann, "Sustainability in the water-energy-food nexus," *Water Int.*, vol. 40, no. 5-6, pp. 723-732, 2015, doi: [10.1080/02508060.2015.1096110](https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1096110).
- [5] S. Ozturk and F. Ozturk, "Forecasting Energy Consumption of Turkey by Arima Model," *J. Asian Sci. Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 52-60, 2018, doi: [10.18488/journal.2.2018.82.52.60](https://doi.org/10.18488/journal.2.2018.82.52.60).
- [6] J. Polprasert, V. A. H. Nguyen, and S. Nathanael Charoensook, "Forecasting Models for Hydropower Production Using ARIMA Method," in *Proceeding of the 2021 9th International Electrical Engineering Congress, IEECON 2021*, 2021, pp. 197-200, doi: [10.1109/IEECON51072.2021.9440293](https://doi.org/10.1109/IEECON51072.2021.9440293).
- [7] D. Gupta, A. Chakrabarti, and J. Gautam, "ARIMA Based Forecasting of stream flows of Three Georges Dam for efficient Water Resource Planning and Management," 2021, doi: [10.1109/ISAECT53699.2021.9668339](https://doi.org/10.1109/ISAECT53699.2021.9668339).
- [8] X. Zhang, X. Wu, G. Zhu, X. Lu, and K. Wang, "A seasonal ARIMA model based on the gravitational search algorithm (GSA) for runoff prediction," *Water Supply*, vol. 22, no. 8, pp. 6959-6977, 2022, doi: [10.2166/ws.2022.263](https://doi.org/10.2166/ws.2022.263).
- [9] Z.-Y. Wang, J. Qiu, and F.-F. Li, "Hybrid models combining EMD/EEEMD and ARIMA for long-term streamflow forecasting," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, 2018, doi: [10.3390/w10070853](https://doi.org/10.3390/w10070853).
- [10] Egemsa, "Central Hidroeléctrica Machupicchn," Egemsa, 2024. <https://www.egemsa.com.pe/central-hidroelectrica-machupicchn>.
- [11] M. P. Gonzalez Casimiro, *Análisis de series temporales: Modelos ARIMA*. 2009.
- [12] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time series analysis: Forecasting and control*, 5th Edition. 2015.
- [13] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, *Time series analysis: Forecasting and control: Fourth edition*. 2013.
- [14] S. González Chavira, "Proyección de la demanda de energía metodologías y aplicaciones," 2020.
- [15] V. M. Rueda, J. D. Velásquez Henao, and C. J. Franco Cardona, "Recent advances in load forecasting using nonlinear models," *DYNA*, vol. 78, no. 167, pp. 36-43, 2011, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-83155175827&partnerID=40&md5=4967267fbb682e52d01979bb1f533c99>.

ANEXO 4

Anexo 4: Lineamientos generales para determinar caudales ecológicos



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha Contra la Corrupción y la Impunidad"

"LINEAMIENTOS GENERALES PARA DETERMINAR CAUDALES ECOLÓGICOS"

TÍTULO I DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1°.- Objeto

Establecer los lineamientos generales aplicables para la determinación de los caudales ecológicos, de acuerdo a las disposiciones establecidas en la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, y su Reglamento, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG y sus modificatorias.

Artículo 2°.- Finalidad

Contar con un instrumento técnico orientador para establecer los criterios técnicos aplicables para la determinación de los caudales ecológicos, y regular el procedimiento de su aprobación.

Artículo 3°.- Ámbito de aplicación

La presente norma es de aplicación a nivel nacional y de cumplimiento obligatorio por todas las personas naturales o jurídicas, de derecho público o privado, que tramiten procedimientos administrativos vinculados a la aprobación de caudales ecológicos; con fines de acreditación de disponibilidad hídrica para todo tipo de uso (proyectos de inversión y otros), y para la planificación de los recursos hídricos en los ámbitos de cuencas, con fines de protección y conservación del ecosistema acuático.

Artículo 4°.- Aspectos que deberá contemplar el caudal ecológico

El caudal ecológico deberá determinarse en función de los objetivos ambientales que se deseen alcanzar en el tramo, subtramo o área del cuerpo natural de agua, que busca conciliar las necesidades de agua del ecosistema y de los usuarios de agua. En ese sentido, se determinará un régimen hidrológico adecuado para el mantenimiento de los procesos ecológicos del ecosistema acuático y la conservación de los cauces de los mismos. Dado que el caudal ecológico presenta variaciones a lo largo del año, en cuanto a su cantidad, deberá determinarse de manera mensual.

Artículo 5°.- Ejercicio de derechos de uso de agua

- 5.1. La determinación de caudales ecológicos efectuada a mérito de la presente norma, no afecta el ejercicio, ni las condiciones de la disponibilidad hídrica y los derechos de uso de agua otorgados con anterioridad a su entrada en vigencia.
- 5.2. En aquellas fuentes naturales de agua en las que luego de descontar los caudales mensuales correspondientes a los derechos de uso de agua otorgados, éste resulte igual o menor al caudal ecológico aprobado en determinados meses; no se otorgarán nuevos derechos de agua en dichos meses.
- 5.3. Cualquier titular de un proyecto de inversión que considere su intervención y/o ejecución en un cuerpo de agua con un caudal ecológico ya aprobado, y cuando la disponibilidad de agua de la fuente no satisface las necesidades de agua del proyecto, el titular deberá realizar las infraestructuras hidráulicas necesarias para garantizar las necesidades de agua del proyecto y no afectar el referido caudal ecológico.

Calle Diecisiete N° 355, Urb. El Palomar - San Isidro - Lima
T: (511) 224-3298
www.ana.gob.pe
www.minagri.gob.pe

EL PERÚ PRIMERO



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego

Autoridad Nacional del Agua

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha Contra la Corrupción y la Impunidad"

TÍTULO II TRAMITOLOGÍA DEL CAUDAL ECOLÓGICO

Artículo 6°.- Estudios para la aprobación del caudal ecológico

- 6.1. El administrado, que solicite la aprobación de caudales ecológicos conforme al artículo 3°, deberá presentar el estudio técnico respectivo a la Autoridad Administrativa del Agua correspondiente, considerando el contenido indicado en los Anexos I o II del presente Lineamiento.
- 6.2. La selección y aplicación de los Anexos I y II, se hará en coordinación con la ANA y sus sedes desconcentradas según sea el caso, y estará en función de las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos ambientales a ser alcanzados; considerando aspectos como la modificación o alteración de los cuerpos naturales de agua y sus bienes asociados, en cantidad, calidad y temporalidad, y de los procesos ecológicos del ecosistema acuático.



Artículo 7°.- Determinación del caudal ecológico en áreas de protección especial



- 7.1. En los casos en que el caudal ecológico sea determinado dentro de áreas naturales protegidas y su correspondiente zona de amortiguamiento o en áreas de conservación regional, el administrado deberá coordinar previamente con la Autoridad competente con la finalidad de que se valide la selección de la especie clave u objetivos de conservación que dependen de los recursos hídricos, conforme a lo establecido en el Plan Maestro de dicha área protegida. Luego se procederá según lo indicado en el numeral 6.2 del presente Lineamiento.
- 7.2. En los casos en que el caudal ecológico sea determinado dentro de sitios Ramsar (humedales de importancia internacional), el administrado deberá coordinar previamente con la Autoridad competente a fin de que se mantengan los criterios de designación de dicho sitio que dependen de los recursos hídricos, contenidos en la Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Luego se procederá según lo indicado en el numeral 6.2 del presente Lineamiento.

Artículo 8°.- Procedimiento para la aprobación del caudal ecológico

La Autoridad Administrativa del Agua (AAA) en cuyo ámbito se determine el caudal ecológico, evaluará y aprobará dichos caudales a través de los siguientes procedimientos:

8.1. Aprobación del caudal ecológico de oficio

La ANA en el marco de sus funciones podrá determinar caudales ecológicos de oficio con fines de planificación de los recursos hídricos y para la protección y conservación del ecosistema acuático, pudiendo utilizar para dicho fin el Anexo I o II del presente Lineamiento, según su consideración. El caudal ecológico será aprobado mediante Resolución Administrativa de la AAA correspondiente.

8.2. Aprobación del caudal ecológico en el marco de proyectos de inversión sujetos al Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental – SEIA



PERÚ Ministerio de Agricultura y Riego



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha Contra la Corrupción y la Impunidad"

Los titulares de proyectos de inversión pueden solicitar la aprobación del caudal ecológico en el mismo acto que se otorga la acreditación de la disponibilidad hídrica mediante:

- a) Opinión Técnica Favorable a la Disponibilidad Hídrica contenida en el Instrumento de Gestión Ambiental.
- b) Proceso de Certificación Ambiental Global INTEGRAMBIENTE

8.3. Aprobación del caudal ecológico de forma independiente

Conforme a lo dispuesto en la R.J. N°007-2015-ANA, para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial, los titulares de proyectos de inversión, presentarán el Anexo 6 el cual considera el cálculo del caudal ecológico en concordancia con lo dispuesto por la ANA. En ese sentido, se procederá según lo indicado en el numeral 6.2 del presente Lineamiento. El caudal ecológico se aprobará en el mismo acto que se otorga la acreditación de la disponibilidad hídrica mediante la Resolución de Aprobación de Disponibilidad Hídrica.

8.4. Aprobación del caudal ecológico en pequeños proyectos



Conforme a lo dispuesto en la R.J. N°007-2015-ANA, para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial de pequeños proyectos, los titulares de los referidos proyectos presentarán el Anexo 7, y se procederá conforme a lo señalado en el numeral 6.2 del presente Lineamiento. En ese sentido, el caudal ecológico se aprobará en el mismo acto que otorga la acreditación de la disponibilidad hídrica mediante Resolución de Aprobación de Disponibilidad Hídrica.



8.5. De la sistematización de los estudios aprobados de caudales ecológicos

Los estudios aprobados por las Autoridades Administrativas del Agua AAA, deberán ser remitidos en formato digital a la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos para su sistematización y publicación.

TÍTULO III

CAUDALES ECOLÓGICOS Y PLANES DE GESTIÓN, APROVECHAMIENTO DE DISPONIBILIDAD HÍDRICA, Y PROGRAMA DE MONITOREO

Artículo 9°.- Caudales Ecológicos y Planes de Gestión de Recursos Hídricos de Cuenca

Los caudales ecológicos aprobados conforme a las disposiciones del presente Lineamiento, deberán ser incorporados en los Planes de Gestión de Recursos Hídricos de Cuenca.

Artículo 10°.- Caudales Ecológicos y Planes de Aprovechamiento de Disponibilidad Hídrica

Los planes de aprovechamiento de disponibilidad hídrica elaborados anualmente por las Autoridades Administrativas del Agua, con base a los cuales se efectúa la distribución de los recursos hídricos, deberán contemplar los caudales ecológicos aprobados.



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Lucha Contra la Corrupción y la Impunidad"

Artículo 11°.- Programa de Monitoreo

Los estudios de caudal ecológico presentados para su aprobación, en todos los casos, deberá contener un programa de monitoreo, cuyos resultados serán reportados a la AAA correspondiente para su evaluación. Asimismo, si este estudio fue aprobado en el marco de un proyecto sujeto al SEIA, la AAA remitirá los resultados del programa de monitoreo al sector ambiental competente y al opinante técnico para su evaluación en lo que corresponda en el marco de sus funciones.

La Autoridad Administrativa del Agua correspondiente, en coordinación con el sector ambiental competente y el opinante técnico, de ser el caso, realizará de oficio el monitoreo del caudal ecológico aprobado, como parte de sus acciones de vigilancia y fiscalización en el marco de sus funciones.

Artículo 12°.- Evaluación del caudal ecológico y medidas correctivas

De ser el caso la Autoridad Administrativa del Agua AAA podrá modificar el caudal ecológico aprobado, si como resultado del programa de monitoreo y de un informe técnico, se comprueba que la determinación de dicho caudal no está cumpliendo con los objetivos ambientales establecidos para el tramo, subtramos o área del cuerpo natural de agua, o si las medidas correctivas aplicadas por el titular del estudio no son suficientes para preservar el ecosistema acuático. Las medidas correctivas deberán estar incorporadas en el estudio de caudal ecológico presentado por el administrado. Para el caso de proyectos dentro del SEIA, las medidas correctivas serán las que están contenidas en el instrumento de gestión ambiental.



7

ANEXO 5: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<u>GENERAL:</u> ¿Es posible desarrollar el análisis energético mediante una propuesta metodológica de una central hidroeléctrica de pasada típica de cuenca peruana a fin de mejorar su aprovechamiento? <u>ESPECÍFICOS:</u> ¿Qué tipo de correlación hay entre caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta en central hidroeléctrica de pasada durante su operación en un intervalo de tiempo? ¿Existe correspondencia entre caudal turbinado y caudal ecológico durante la operación de una central hidroeléctrica de pasada? ¿Qué escenarios alternativos se tendría, si se inyecta agua al sistema de generación de energía eléctrica a través de reservorios naturales? ¿Cuánta energía adicional se podría producir en época de estiaje, si durante la operación de una central hidroeléctrica se inyecta un volumen de agua proveniente de reservorios?	<u>GENERAL:</u> El objetivo general de la presente tesis doctoral es establecer una metodología de análisis energético de una central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana con fines de mejorar su aprovechamiento. <u>ESPECÍFICOS:</u> - Establecer la correlación entre el caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta de una central hidroeléctrica de pasada durante su operación en un intervalo de tiempo. - Determinar la correspondencia entre el caudal de turbinado y el caudal ecológico durante la operación de una central hidroeléctrica de pasada. - Plantear escenarios alternativos de inyección de agua al sistema de generación de energía eléctrica a través de reservorios naturales. - Cuantificar la energía eléctrica adicional que se podría producir en época de estiaje, si durante la operación de una central hidroeléctrica se inyecta un volumen de agua proveniente de reservorios.	<u>GENERAL:</u> El análisis energético a una central hidroeléctrica de pasada típica de la cuenca peruana permite mejorar su aprovechamiento en base a una propuesta metodológica con variable de disponibilidad hídrica. <u>ESPECÍFICAS:</u> - Existe correlación entre caudal turbinado, potencia efectiva, energía generada y factor de planta de una central hidroeléctrica de pasada durante su operación en un intervalo de tiempo. - Es posible encontrar correspondencia entre caudal turbinado y caudal ecológico durante operación de una central hidroeléctrica de pasada. - La inyección de agua a la central hidroeléctrica de pasada a través de los reservorios naturales son una alternativa durante la época crítica de operación de la central. - Es factible cuantificar la energía eléctrica adicional que se podría producir en una central hidroeléctrica durante la época de estiaje, si al momento de operar se inyecta un volumen de agua adicional proveniente de un reservorio.	<u>VARIABLE INDEPENDIENTE:</u> Caudal turbinado, caudal ecológico. <u>VARIABLES DEPENDIENTES:</u> Potencia efectiva, energía generada, factor de planta	- Se utilizará un enfoque multidisciplinario que combina métodos de ingeniería, análisis energético y evaluación ambiental. - Recopilación de datos mediante estudios de campo, revisión bibliográfica y consulta de bases de datos relevantes. - Análisis de datos mediante herramientas de modelado hidrológico, simulaciones computacionales y técnicas estadísticas. - Evaluación de la proyección de datos utilizando metodologías reconocidas a nivel internacional. - Formulación de recomendaciones basadas en los resultados obtenidos y en las mejores prácticas en gestión ambiental y energética.

ANEXO 6: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN	Instrumento / Técnica de Recolección
Caudal turbinado	Volumen de agua que pasa por la turbina para generar energía eléctrica en un tiempo determinado	Caudal instantáneo	Caudal medido en m ³ /s	Cuantitativa, razón	Medición con caudalímetro ultrasónico o hidrométrico
Caudal ecológico	Volumen mínimo de agua que debe mantenerse en el cauce para preservar el ecosistema acuático	Caudal mínimo ecológico	Caudal regulado y registrado en m ³ /s	Cuantitativa, razón	Registros oficiales de caudal ecológico y normativas ambientales
Potencia efectiva	Potencia eléctrica real que entrega la central hidroeléctrica durante su operación	Potencia instantánea	Potencia en kW registrada en tiempo real	Cuantitativa, razón	Medidor de potencia eléctrica, registros operativos
Energía generada	Cantidad total de energía eléctrica producida en un periodo determinado	Energía mensual	Energía en kWh generada	Cuantitativa, razón	Contadores de energía, registros de generación
Factor de planta	Relación entre la energía realmente generada y la energía que podría haberse generado si la planta operara a plena capacidad todo el tiempo	Factor de utilización	Porcentaje (%) de uso de la capacidad instalada	Cuantitativa, porcentaje	Cálculo a partir de energía generada y potencia máxima