

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA**



TESIS

**Análisis estocástico de los caudales regulados para la producción de
energía eléctrica del embalse gallito ciego por medio de simulación de
eventos discretos**

Presentada para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias de la
Ingeniería Mecánica Eléctrica con Mención en Energía

Investigador:

Mag. César Dany Sialer Díaz

Asesor:


Dr. Juan José Uchuya López

Lambayeque, 2024

Análisis estocástico de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse gallito ciego por medio de simulación de eventos discretos.



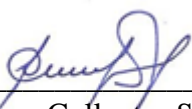
Mag. César Dany Sialer Díaz
Autor



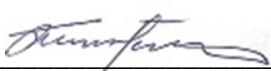
Dr. Juan José Uchuya López
Asesor

Tesis presentada a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo para optar el Grado Académico de: DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA.

Aprobado por:



Dr. Luis Jaime Collantes Santisteban
Presidente del jurado



Dr. Segundo Abelardo Horna Torres
Secretario del jurado



Dr. Daniel Carranza Montenegro.
Vocal del jurado

Análisis estocástico de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse Gallito Ciego por medio de Simulación de Eventos Discretos

INFORME DE ORIGINALIDAD

11 %	10 %	5 %	4 %
ÍNDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3 %
2	qdoc.tips Fuente de Internet	1 %
3	oa.upm.es Fuente de Internet	1 %
4	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	1 %
5	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
6	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
7	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %
8	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1 %

9	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to consultoriadeserviciosformativos Trabajo del estudiante	<1 %
11	Flores Takahashi, Jose Satoshi. "Análisis de una red de monitoreo de calidad de agua en la cuenca del río Jequetepeque mediante análisis multivariado", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Peru), 2021 Publicación	<1 %
12	docslide.us Fuente de Internet	<1 %
13	theibfr.com Fuente de Internet	<1 %
14	zagan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
15	siea.midagri.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
16	www.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
17	Halim, Tony, and Kanesan Muthusamy. "Fuzzy Available-to-Promise System Modelling under Supplier Uncertainty", Advanced Materials Research, 2011.	<1 %

Publicación

18	repositorio.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	tesisred.net Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.unprg.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad TecMilenio Trabajo del estudiante	<1 %
23	Submitted to Universidad de Manizales Trabajo del estudiante	<1 %
24	idus.us.es Fuente de Internet	<1 %
25	savezeditorial.com Fuente de Internet	<1 %
26	archive.org Fuente de Internet	<1 %
27	ecosolar.cubaenergia.cu Fuente de Internet	<1 %
28	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.uandina.edu.pe	

	Fuente de Internet	<1 %
30	José Jaime Madrigal Barrera. "Análisis de pronósticos climáticos para la previsión de sequías meteorológicas e hidrológicas", Universitat Politecnica de Valencia, 2020 Publicación	<1 %
31	agradecimientos.win Fuente de Internet	<1 %
32	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
34	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
35	www.cacic2016.unsl.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
36	www.un.org Fuente de Internet	<1 %
37	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD Trabajo del estudiante	<1 %
38	Submitted to Universidad Privada Boliviana Trabajo del estudiante	<1 %
	docplayer.es	

39

Fuente de Internet

<1%

40

www.iberdrola.com

Fuente de Internet

<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo





Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Cesar Dany Sialer Diaz
Título del ejercicio:	Tesis de Posgrado
Título de la entrega:	Análisis estocástico de los caudales regulados para la produ...
Nombre del archivo:	TESIS_DOCTORADO_-_SIALER_20.06.24_FINAL.docx
Tamaño del archivo:	5.78M
Total páginas:	94
Total de palabras:	18,928
Total de caracteres:	105,423
Fecha de entrega:	27-jun.-2024 08:14p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	2409627373



CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

SEÑOR
Dr. IVAN EDUARDO SALVADOR BRICEÑO
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE POSGRADO-UNPRG
S.D.

Yo, Juan José Uchuya López, asesor del programa de **DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA** de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo y designado mediante RESOLUCIÓN N.º 568-2022-EPG-VIRTUAL de fecha 27 de mayo de 2022, para asesorar al tesista Cesar Dany Sialer Díaz con la investigación titulada: **"Análisis estocástico de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse Gallito Ciego por medio de Simulación de Eventos Discretos"**.

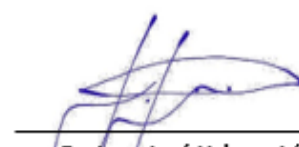
Se hace mención los datos principales extraídos del recibo digital del reporte Software Turnitin: tamaño de archivo: 5.78 MB, total de páginas: 94, total de palabras: 18928, total de caracteres: 105423, fecha de entrega: 27 de junio 2024 08:14 pm.

Asimismo, se deja constancia que la investigación tiene un índice de similitud del 11 % verificable en el reporte final del informe de originalidad mediante el Software Turnitin.


Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Lambayeque, 27 de junio de 2024



Dr. Juan José Uchuya López
DNI N° 41421094
Código Orcid N°0000-0002-6810-1065
Celular N° 987753286
ASESOR DE TESIS



Mag. César Dany Sialer Díaz
DNI N° 16731363
TESISTA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

189

Siendo las 11:15 horas del día 16 de Agosto del año Dos Mil
veinte y cuatro, en la Sala de Sustentación de la Escuela de Posgrado de la

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, se reunieron los miembros del Jurado,
designados mediante Resolución N° 506-2024-EPG de fecha 30/07/2024, conformado por:

Dr. JAIME COLLANTES SANTISTEBAN PRESIDENTE (A)
Dr. SEGUNDO ABELARDO HORNA TORRES SECRETARIO (A)
Dr. DANIEL CARANZA MONTENEGRO VOCAL
Dr. JUAN JOSE UCHUYA LOPEZ ASESOR (A)

Con la finalidad de evaluar la tesis titulada "ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE
LOS CAUDALES REGULADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA DEL EMBALE GOLLIJO CIEGO
POR MEDIO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS"

presentado por el (la) Tesisista CECILE DANY SIOLERA DIAZ

sustentación que es autorizada mediante Resolución N° 521-2024-EPG de fecha 05
Agosto 2024

El Presidente del jurado autorizó del acto académico y después de la sustentación, los señores
miembros del jurado formularon las observaciones y preguntas correspondientes, las mismas que
fueron absueltas por el (la) sustentante, quien obtuvo 18 puntos que equivale al
calificativo de MUY BUENO

En consecuencia el (la) sustentante queda apto (a) para obtener el Grado Académico de:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA

Siendo las 12:20 horas del mismo día, se da por concluido el acto académico, firmando la
presente acta.



PRESIDENTE



SECRETARIO



VOCAL



ASESOR

Declaración jurada de originalidad

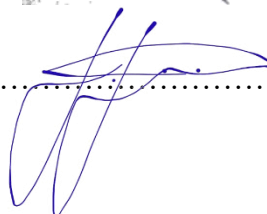
Yo, César Dany Sialer Díaz, y Juan José Uchuya López, asesor del trabajo de investigación “Análisis estocástico de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse Gallito Ciego por medio de Simulación de Eventos Discretos”, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrará lo contrario, asumo responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiere lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 20 de junio de 2024.

Nombre del investigador: César Dany Sialer Díaz



Nombre del asesor: Juan José Uchuya López



Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mi adorada madre Aurea Elcina, por su apoyo y sacrificio en mi educación. Cada día que trabajaste incansablemente y cada vez que me brindaste tu cariño son tesoros que valoro profundamente. Esta tesis es una modesta forma de agradecerte por todo lo que has hecho por mí.

Agradecimiento

Agradezco a mi asesor, el Dr. Uchuya, por su paciencia y orientación en el desarrollo y culminación de mi tesis; así también, agradezco a los docentes del programa de Doctorado en ciencias de la Ingeniería Mecánica y eléctrica con mención en Energía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por el excelente programa, ha sido una experiencia gratificante.

Agradezco también a mi amigo, el Dr. Reyes Tassara, por estar allí animándome para terminar mi tesis. Te lo agradeceré siempre amigo, cuenta conmigo para lo que te haga falta.

Índice General

Introducción.....	1
Capítulo I. Diseño Teórico	10
1.1 Antecedentes de la Investigación	10
1.2 Base Teórica	20
1.2.1 Embalses y presas	20
1.2.2 Métodos de caracterización hidrológica	24
1.2.3 Tipos de modelos hidrológicos.....	25
1.2.4 Distribuciones estadísticas.....	27
1.3 Definiciones Conceptuales	33
1.4 Operacionalización de Variables	34
1.5 Hipótesis	34
Capítulo II. Métodos y Materiales	36
2.1 Tipo de Investigación	36
2.2 Método de Investigación	38
2.3 Diseño de Contrastación	39
2.4 Población, Muestra y Muestreo	40
2.5 Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos	40
2.6 Procesamiento y Análisis de Datos	42
Capítulo III. Implementación de la simulación estocástica	44
3.1 Sistema de simulación discreta.....	44
3.2 Etapas de la simulación	45
3.3 ARENA	46
3.4 Esquema de simulación	46
3.5 Modelo lógico.....	48
3.6 Modelo de simulación en Arena.....	52
Capítulo IV. Resultados.....	60
4.1 Datos de entrada	60
4.2 Resultados de caso real.....	62
4.3 Discusión de los resultados	64
4.4 Contrastación de hipótesis	70

4.5 Aporte	72
Conclusiones.....	75
Recomendaciones	77
Referencias Bibliográficas.....	78
Anexos	81
Anexo 1: Balance hídrico 2022-2023	81
Anexo 2: Oferta hídrica 2022-2023	81

Índice de Tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables	34
Tabla 2 Contrastación de hipótesis	39
Tabla 3 Relación de datos de entrada y salida del estudio.	52
Tabla 4 Datos de entrada de año hídrico.	62
Tabla 5 Datos de salida de año hídrico para el modelo de simulación de 5, 10 y 15 años..	63

Índice de Figuras

Figura 1 Producción de energía, volumen turbinado y rendimiento por centrales hidroeléctricas 2019 (Sialer, C., 2021)	2
Figura 2 Esquema del embalse Gallito Ciego por estudio batimétrico 2013. (Adaptado PEJEZA, 2015).....	7
Figura 3 Estación Monte Grande, Yonan, Contumaza, Cajamarca. (SENAMHI, s.f)	7
Figura 4 Esquema general del enfoque metodológico estocástico propuesto en esta tesis (Gabriel, 2020)	14
Figura 5 Diagrama metodológico general. T = temperatura, P =Precipitación, ETP=Evapotranspiración potencial y Q= caudales. (García, 2020).....	16
Figura 6 Diagrama de flujo del proceso para derivar la distribución de incertidumbre predictiva condicional. (Romero, 2019).....	18
Figura 7 Reservorio Gallito Ciego, Cajamarca. (PEJEZA, s.f.).....	21
Figura 8 Ficha técnica de la función de distribución gamma. (Guasch et al, 2002).....	28
Figura 9 Función de distribución gamma ($\beta=1$). (Guasch et al, 2002).....	29
Figura 10 Línea de producción. (Guasch et al, 2002).	31
Figura 11 Ficha técnica de la función de distribución normal. (Guasch et al, 2002).	32
Figura 12 Función de distribución normal. (Guasch et al, 2002).	33
Figura 13 Componentes principales de una presa (Yali, 2018).....	34
Figura 14 Diagrama de propuesta metodológica general	39
Figura 15 Esquema de simulación.....	47
Figura 16 Esquema de una central hidroeléctrica.....	48
Figura 17 Ejemplo de marco lógico del modelo de simulación en Arena.....	53
Figura 18 Marco Lógico del mes de agosto de año 1	53
Figura 19 Creación y cuadros de resultados típico de mes.....	54
Figura 20 Marco Lógico del mes de setiembre de año 1	56
Figura 21 Marco Lógico del mes de octubre de año 1	56
Figura 22 Marco Lógico del mes de noviembre de año 1	56
Figura 23 Marco Lógico del mes de diciembre de año 1	57
Figura 24 Marco Lógico del mes de enero de año 2	57
Figura 25 Marco Lógico del mes de febrero de año 2.....	57
Figura 26 Marco Lógico del mes de marzo de año 2	58

Figura 27 Marco Lógico del mes de abril de año 2	58
Figura 28 Marco Lógico del mes de mayo de año 2	58
Figura 29 Marco Lógico del mes de junio de año 2	59
Figura 30 Marco Lógico del mes de julio de año 2	59
Figura 31 Curva de Oferta hídrica al 75% en Hm^3	64
Figura 32 Curva de Demanda bruta superficial del reservorio en Hm^3	65
Figura 33 Curva de Pérdidas del sistema mayor por evaporación en Hm^3	66
Figura 34 Curva de Déficit en Hm^3	67
Figura 35 Curva de Superávit en Hm^3	68
Figura 36 Curva de Volumen útil del reservorio a inicio de mes en Hm^3	69
Figura 37 Curva de Volumen útil del reservorio a fin de mes en Hm^3	69
Figura 38 Curva de Energía en GWh	70

Resumen

Este trabajo de investigación analiza el comportamiento de los caudales regulados en el embalse Gallito Ciego mediante la Simulación de Eventos Discretos (SED). Se desarrolló un modelo estocástico que permite predecir variaciones en la oferta hídrica, la demanda, las pérdidas por evaporación y el volumen útil del embalse. Los objetivos específicos incluyeron la representación precisa de las fluctuaciones mensuales del volumen del embalse y la cuantificación de los impactos de déficits y superávits de agua en la producción de energía. Los resultados mostraron que el modelo estocástico es capaz de replicar con alta precisión los datos reales de caudales regulados, mejorando significativamente las proyecciones iniciales. Se observó que el horizonte de tiempo de 15 años ofrece una tendencia más ajustada y precisa en comparación con los periodos más cortos. Las hipótesis fueron contrastadas positivamente, confirmando la efectividad del modelo estocástico para la gestión y optimización de la producción de energía eléctrica en el embalse Gallito Ciego.

Palabras Claves: Caudales regulados, Producción de energía eléctrica y Análisis estocástico.

Abstract

This research analyzes the behavior of regulated flows in the Gallito Ciego reservoir through Discrete Event Simulation (DES). A stochastic model was developed to predict variations in water supply, demand, evaporation losses, and the useful volume of the reservoir. Specific objectives included accurately representing the monthly fluctuations of the reservoir volume and quantifying the impacts of water deficits and surpluses on energy production. The results showed that the stochastic model can replicate real data on regulated flows with high precision, significantly improving initial projections. It was observed that the 15-year time horizon offers a more accurate and precise trend compared to shorter periods. The hypotheses were positively tested, confirming the effectiveness of the stochastic model for managing and optimizing energy production in the Gallito Ciego reservoir.

Keywords: Regulated flows, Electric power production and stochastic analysis.

Introducción

El recurso hídrico es esencial para la vida humana, no solo para el consumo directo, sino también para el desarrollo de actividades agrícolas mediante el riego de áreas de cultivo. Sin embargo, el control y manejo adecuado de este recurso se presenta como un desafío significativo, especialmente cuando se trata de equilibrar las necesidades de las empresas hidroeléctricas y la demanda hídrica de la población local. Este balance, frecuentemente marcado por incertidumbres respecto al manejo del recurso, destaca la necesidad de realizar estudios hidrológicos precisos y pronósticos confiables.

En las regiones de La Libertad, Lambayeque y Cajamarca, la Central Hidroeléctrica (C.H.) Gallito Ciego juega un papel crucial. Con una potencia instalada de 34 MW y una capacidad de producción máxima de 166 GWh, esta central utiliza el agua almacenada en su embalse para generar energía. La energía producida se transporta a través de la Red del Sistema Interconectado Nacional, y el despacho de esta energía se programa conforme a los requerimientos de los usuarios del Valle de Jequetepeque, con la aprobación de la autoridad local de agua jequetepeque. Es importante resaltar que la C.H. Gallito Ciego no consume agua para la generación de energía; en su lugar, el agua es turbinada y luego almacenada en una poza de compensación, desde donde se distribuye al Valle de Jequetepeque según un caudal regulado.

En 2019, la C.H. Gallito Ciego alcanzó una potencia efectiva de 35.28 MW, lo que la posicionó favorablemente en términos de despacho de energía. No obstante, este logro contrasta con los desafíos significativos que enfrenta la central debido a la incertidumbre climática que afecta al Valle de Jequetepeque. La variabilidad en las precipitaciones altera el volumen del embalse y los caudales de los ríos, impactando directamente la producción de energía. En respuesta a esta incertidumbre, se decidió utilizar la poza de compensación

para almacenar agua y abastecer al río Jequetepeque, con el fin de satisfacer la demanda hídrica de la región.

Figura 1 Producción de energía, volumen turbinado y rendimiento por centrales hidroeléctricas 2019 (Sialer, C., 2021)

EMPRESAS	CENTRAL	POTENCIA EFECTIVA (MW)	CAUDAL TURBINABLE (m ³ /s)	ENERGÍA (GW.h)	VOLUMEN TURBINADO (Millones de metros cúbicos)	RENDIMIENTO MEDIO (KW.h/m ³)
STATKRAFT	C.H. CAHUA	45.38	24.31	277.99	536.02	0.52
	C.H. CHEVES	176.35	33.38	778.04	530.23	1.47
	C.H. GALLITO CIEGO	35.28	41.11	143.81	603.26	0.24
	C.H. HUAYLLACHO	0.21	0.16	0.71	1.94	0.36
	C.H. MALPASO	48.45	80.39	247.26	1,477.00	0.17
	C.H. MISA PUQUIO	3.87	2.16	22.66	45.45	0.50
	C.H. OROYA	9.09	6.56	52.51	136.48	0.38
	C.H. PACHACHACA	9.74	6.61	34.65	84.56	0.41
	C.H. PARIAC	4.95	2.20	16.58	26.52	0.63
	C.H. SAN ANTONIO	0.55	2.39	2.86	44.26	0.06
	C.H. SAN IGNACIO	0.43	2.52	2.15	45.77	0.05
	C.H. YAUPÍ	113.69	29.05	795.72	731.98	1.09

La incertidumbre en las precipitaciones de lluvia se traduce en fluctuaciones en el volumen del embalse, lo cual afecta la capacidad de la central para producir energía de manera constante. En periodos de tiempo determinados, las estaciones hidrológicas recopilan datos sobre el volumen del embalse en puntos temporales finitos. La evaluación de estos volúmenes no es determinista; contiene una variación aleatoria que se comporta de manera probabilística. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis estocástico y utilizar simulaciones de eventos discretos. Un modelo hidrológico dinámico, que contemple la dependencia temporal y opere en un ambiente abierto, es fundamental para capturar la complejidad del sistema y su influencia sobre la energía y el caudal del río en el Valle de Jequetepeque.

La modelación de los caudales regulados representa otro problema significativo. Comprender y analizar el sistema mediante simulaciones prácticas es complicado debido a

la necesidad de conocer detalladamente las características, atributos y especificaciones de los elementos y agentes que intervienen en el sistema real. Construir un modelo que resuelva los problemas del caudal regulado aplicando métodos analíticos y empíricos, y que llegue a soluciones óptimas o cercanas a lo óptimo, resulta una tarea extremadamente compleja.

La variabilidad en la oferta hídrica, causada por fluctuaciones climáticas, es un desafío considerable para la gestión del embalse. Esta variabilidad implica que en algunos periodos el embalse puede experimentar déficits de agua, mientras que en otros puede enfrentar superávits que exceden su capacidad máxima de almacenamiento de 366.09 Hm³. Los déficits hídricos afectan la generación de energía eléctrica, reduciendo la disponibilidad de electricidad para la red. Este déficit no solo tiene implicaciones económicas, al necesitar recurrir a fuentes de energía más costosas, sino que también puede generar conflictos por el uso del agua entre diferentes sectores.

Las pérdidas por evaporación agravan la situación. En la región del embalse, caracterizada por altas temperaturas y baja humedad, la evaporación puede representar una pérdida significativa del volumen almacenado. Estas pérdidas pueden alcanzar hasta 01 Hm³ mensual, lo que incrementa el déficit hídrico y reduce la eficiencia en la generación de energía. La falta de mecanismos efectivos para mitigar estas pérdidas aumenta la presión sobre los recursos hídricos disponibles, complicando aún más la gestión del embalse.

La demanda de agua en la región también muestra una variabilidad considerable. La demanda de agua por parte de los sectores agrícola, industrial y doméstico varía mensualmente, con picos durante las temporadas de cultivo y menores demandas en otras épocas del año. Esta demanda fluctuante requiere una gestión flexible y precisa del caudal, lo que actualmente no se logra con los métodos de predicción y gestión tradicionales. La

demanda bruta superficial ha registrado valores que oscilan entre 70 y 120 Hm³ por mes, con una tendencia al alza debido al crecimiento poblacional y la expansión agrícola.

El volumen útil del embalse al inicio y fin de cada mes es importante para mantener un volumen óptimo de agua almacenada, que permita tanto la generación de energía eléctrica como el suministro continuo de agua para otros usos, es esencial. Sin embargo, el volumen útil está directamente afectado por los déficits y superávits de agua, lo que complica su gestión. La falta de precisión en la predicción de estos volúmenes genera incertidumbre y decisiones subóptimas en la operación del embalse.

Las discrepancias entre los resultados proyectados y reales del embalse Gallito Ciego reflejan fallos en los modelos actuales de predicción y gestión. Estas discrepancias generan incertidumbre y reducen la eficacia de la gestión del embalse. Los modelos actuales no logran captar adecuadamente la estocasticidad del sistema hídrico, lo que se traduce en decisiones operativas basadas en datos inexactos o desactualizados.

La incapacidad de predecir con precisión el comportamiento del caudal regulado y de implementar una gestión adaptativa del embalse tiene consecuencias directas sobre la producción de energía eléctrica. En periodos de déficit, la reducción en la generación de energía se traduce en una menor disponibilidad de electricidad, afectando tanto a la población como a la industria. En el caso de superávit, la liberación forzada de agua implica una pérdida de potencial energético, disminuyendo la eficiencia del sistema y afectando la rentabilidad económica de la planta hidroeléctrica.

Además, la gestión ineficaz del embalse puede derivar en conflictos por el uso del agua, especialmente en regiones donde este recurso es escaso. Los sectores agrícola e industrial, que dependen del agua del embalse para sus operaciones, pueden enfrentar restricciones y limitaciones durante periodos de déficit, afectando su productividad y, en consecuencia, la economía local. Estos conflictos pueden intensificarse en el contexto del

cambio climático, que exacerba las condiciones de variabilidad hídrica y aumenta la competencia por los recursos disponibles.

El problema de estudio radica en la necesidad de desarrollar un enfoque estocástico y basado en la simulación de eventos discretos para gestionar el caudal regulado del embalse Gallito Ciego de manera más eficiente y precisa. La variabilidad en la oferta hídrica, la demanda fluctuante, las pérdidas por evaporación y el manejo del volumen útil del embalse son factores interrelacionados que complican la gestión actual y afectan negativamente la producción de energía eléctrica. Abordar estos desafíos mediante modelos avanzados y técnicas de simulación podría optimizar la operación del embalse, mejorando la capacidad de generación de energía y la gestión integral del recurso hídrico, con beneficios económicos y sociales significativos para la región.

En ese sentido, la formulación del problema general es:

¿Cómo se puede analizar estocásticamente el comportamiento de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse Gallito Ciego mediante la Simulación de Eventos Discretos, considerando las variaciones en la oferta hídrica, demanda, pérdidas por evaporación y el volumen útil del embalse?

Los problemas específicos son:

- ¿Cómo se puede modelar matemáticamente y simular el comportamiento estocástico del volumen útil del embalse Gallito Ciego utilizando la Simulación de Eventos Discretos?
- ¿Cuál es el impacto de los déficits y superávits en la demanda y capacidad de generación de energía del embalse Gallito Ciego?
- ¿Cómo se comparan los resultados del modelo lógico estocástico con los datos reales y proyectados del embalse Gallito Ciego, y qué discrepancias pueden identificarse y corregirse para mejorar el modelo?

El objetivo general es:

Analizar estocásticamente los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse Gallito Ciego por medio de Simulación de Eventos Discretos.

Los objetivos específicos son:

- Modelar matemáticamente y simular el comportamiento estocástico del volumen útil por eventos discretos del embalse Gallito Ciego.
- Evaluar el impacto de los déficits y superávits en la demanda y capacidad de generación de energía del embalse.
- Comparar los resultados del modelo lógico estocástico con los datos reales y proyectados del embalse Gallito Ciego.

Según el Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña (PEJEZA, 2015), la Central Hidroeléctrica Gallito Ciego inició sus operaciones con un volumen útil de aproximadamente 427 MMC. Sin embargo, estudios realizados en 2010 y 2013 mostraron una disminución del volumen del embalse, reduciéndose a 371.63 MMC y 366.60 MMC respectivamente. A pesar de esta tendencia, estudios batimétricos de 2017 indicaron una disminución mínima de solo 0.52 MMC, lo que sugiere una constancia en el volumen útil del embalse.

Figura 2 Esquema del embalse Gallito Ciego por estudio batimétrico 2013. (Adaptado PEJEZA, 2015)

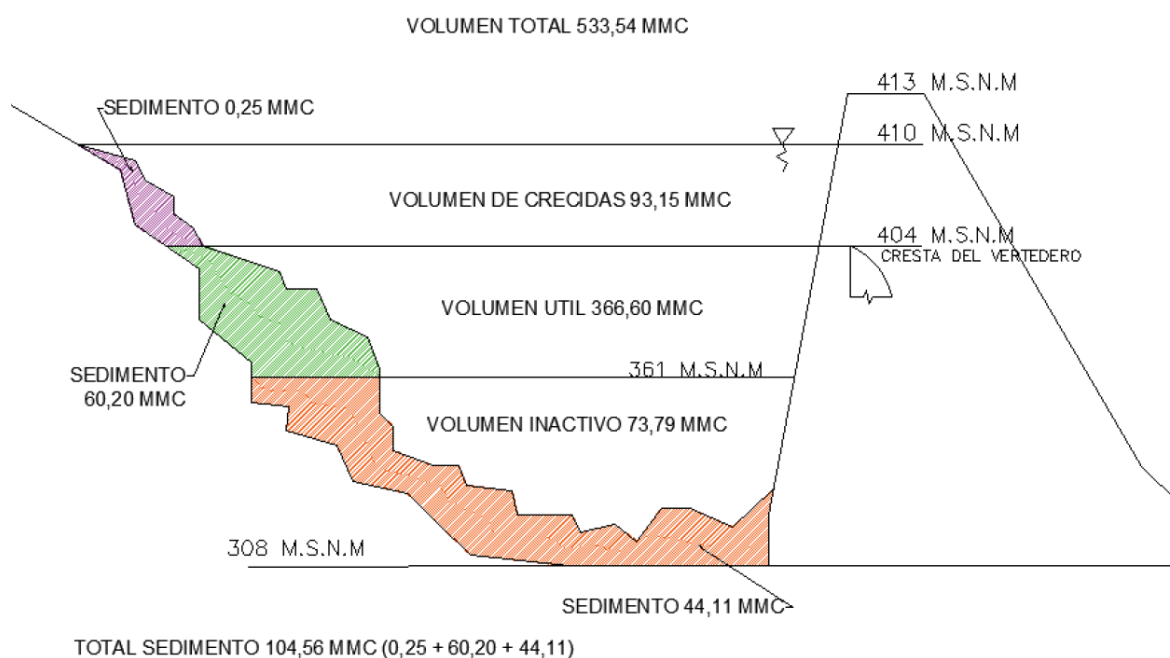
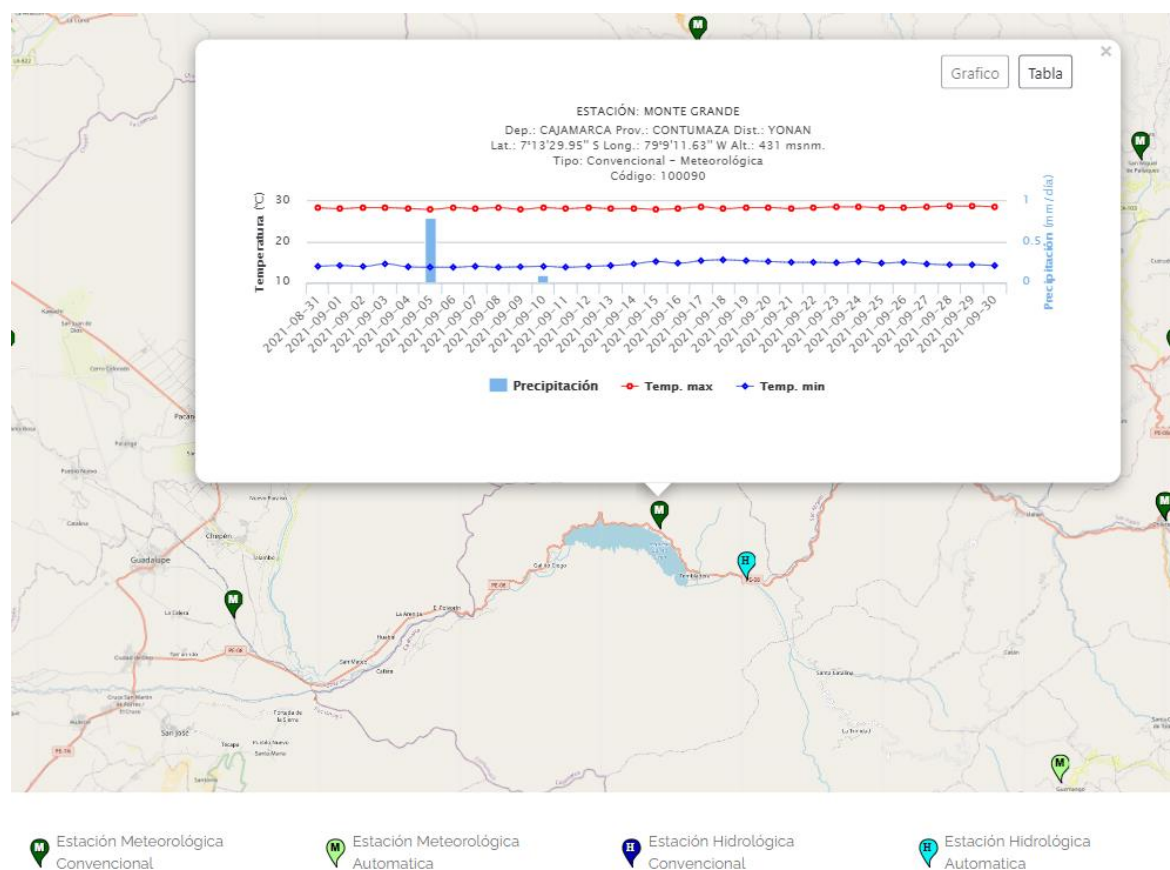


Figura 3 Estación Monte Grande, Yonan, Contumaza, Cajamarca. (SENAMHI, s.f)



Esta constancia en el volumen útil del embalse permite asegurar la viabilidad del análisis del caudal regulado. Además, se pueden seguir los cambios hidrometeorológicos en Gallito Ciego a través de la página web del SENAMHI, utilizando una estación meteorológica convencional para observar y registrar las temperaturas y precipitaciones diarias, presentadas en forma de gráficos o tablas según sea necesario para la manipulación de la información, como se muestra en la Figura 3.

El estudio del embalse Gallito Ciego puede justificarse desde varios factores:

1. **Social:** El análisis del caudal regulado favorece el desarrollo de la población del Valle Jequetepeque, proporcionando el recurso hídrico necesario para actividades agrícolas y consumo humano. Además, la energía eléctrica generada permite implementar mejoras significativas en las zonas rurales.
2. **Técnico:** El estudio implica la operación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Gallito Ciego, garantizando el abastecimiento de agua regulada al río y al valle. Una gestión hídrica adecuada asegura que los niveles del embalse sean suficientes para satisfacer la demanda tanto de agua como de energía eléctrica.
3. **Económico:** Una gestión hidrometeorológica adecuada evita pérdidas relacionadas con la operación y mantenimiento del embalse. Esto sigue las directrices establecidas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la principal autoridad técnico-normativa sobre la gestión del recurso hídrico a nivel nacional.
4. **Ambiental:** Mantener el recurso hídrico necesario preserva la integridad del Valle Jequetepeque, asegurando que el río Jequetepeque tenga condiciones favorables para el riego y el desarrollo agrícola. Además, un caudal regulado adecuado minimiza las consecuencias de inundaciones por precipitaciones irregulares y la colmatación del embalse.

5. **Teórico:** El estudio introduce una metodología estocástica para analizar los caudales regulados, resolviendo problemas de forma estadística en lugar de determinista. Esta investigación emplea soluciones estocásticas como alternativa metodológica.

El sistema real del caudal regulado será analizado mediante la Simulación de Eventos Discretos, utilizando variables y parámetros con comportamientos probabilísticos, establecidos a partir de estudios históricos de los caudales anuales. Esta metodología permitirá modelar matemáticamente y simular el comportamiento estocástico del volumen útil del embalse Gallito Ciego, evaluando el impacto de los déficits y superávits en la demanda y capacidad de generación de energía. Además, comparará los resultados del modelo lógico estocástico con los datos reales y proyectados, identificando posibles discrepancias para mejorar la precisión del modelo y optimizar la toma de decisiones en la gestión del embalse.

Capítulo I. Diseño Teórico

1.1 Antecedentes de la Investigación

Para Bellin, A., Majone, B., Cainelli, O., Alberici, D., & Villa, F. (2016), la modelación hidrológica es la base para la evaluación, manejo y gestión de los recursos hídricos en una cuenca. El modelamiento hidrológico busca resolver los problemas de disponibilidad de agua al estimar el caudal que fluye en la cuenca por un sistema de drenaje, para así abastecer y controlar la demanda del recurso hídrico, de forma natural o regulado. El modelamiento hídrico es sustancial para evaluar el caudal regulado, cuyo fin es disponer de agua en una zona para, principalmente, el consumo humano y el riego, además de tener otras aplicaciones como el de controlar inundaciones.

Hay dos caminos para el modelamiento hidrológico, el determinístico y el estocástico, es así que Gabriel-Martin, I., Sordo-Ward, A., Garrote, L., & Castillo, L. G. (2017) propone una metodología estocástica para la seguridad de las presas hidrológicas, un estudio que evalúa la probabilidad asociada a los escenarios de falla de puerta mediante el análisis de las crecidas entrantes. El proceso estocástico evalúa escenarios en condiciones normales y variables, es el caso de este estudio que asume cuatro escenarios considerando los niveles iniciales de variables del reservorio, los periodos de retorno según el nivel de referencia alcanzado en el embalse, descargas máximas del aliviadero, con el propósito de analizar la fluctuación de los niveles iniciales del embalse y los diferentes escenarios de falla de compuerta, representados desde los caudales máximos como variables. Con el análisis de las fluctuaciones de los niveles de embalse, según Gabriel-Martin, I., Sordo-Ward, A., Garrote, L., & Granados, I. (2019), se puede evaluar la influencia del nivel inicial del embalse en la seguridad y el análisis de riesgos de las presas hidrológicas de forma determinista por el nivel del embalse considerado al inicio de los episodios de inundación

adquiere mayor importancia para evaluar el riesgo real de las presas en operación, siguiendo tres escenarios: nivel inicial del reservorio igual al nivel máximo normal, igual al nivel máximo de conservación, y siguiendo la distribución de probabilidad de los registros históricos. Lo importante en este artículo es que combina el riesgo hidrológico de la presa con el nivel máximo de agua alcanzado en el embalse, durante el enrutamiento de la inundación, y el riesgo de inundación en el tramo río abajo, vinculado a las descargas de descarga de la presa, dando lugar a una comparación de los caudales naturales con los caudales regulados.

Fruchart & Camenen (2012) aborda el problema de mantener libre de sedimentos en los embalses a través de una gestión de sedimentos que permita atender la demanda de recursos hídricos, que aumenta, mientras que a raíz de los sedimentos disminuye la capacidad de los embalses. Analiza el nivel del embalse para no perder energía y/o agua para mantener la mejor capacidad operativa y tener en cuenta las consecuencias ambientales. El artículo aporta una descripción sobre el vaciado de los embalses de forma regulada siguiendo directivas y las limitaciones ambientales aguas debajo de las presas.

Ko, Mascaro & Vivoni (2019) evalúa aplicaciones relacionadas con el agua, entre ellas los modelos hidrológicos distribuidos, aún con las limitaciones en la validación de la data procesada y el gasto computacional, se propone un simulador integrado de cuenca en tiempo real. Primero, se generan forzamientos hidrometeorológicos confiables de alta resolución (1 km) corrigiendo con observaciones terrestres y aplicando rutinas de reducción de escala que utilizan información del terreno en alta resolución, que está disponible a nivel mundial. Segundo, se desarrolla una estrategia para obtener cuadrículas de parámetros del suelo de alta resolución (250 m) mediante la integración de un mapa de suelos de resolución gruesa basado en la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación con conjuntos de datos globales de alta

resolución publicados. Tercero, se aplica el modelo durante un período decenal (2004-2013) y se utiliza un conjunto de herramientas complementarias, que incluyen diagramas de Taylor, análisis de conectividad y análisis empírico de funciones ortogonales, para evaluar su capacidad para simular patrones espaciales de temperatura de la superficie terrestre a través de la comparación con productos diarios por teledetección.

Pan, Housh, Liu, Cai & Chen (2015) evalúan la incertidumbre en las operaciones de reservorios, aplicando métodos de optimización estocástica a problemas de gran escala en función de distribución estimada robusta, iterativa, manejable para un problema de energía hidroeléctrica de períodos múltiples, de funciones no lineales. El estudio es dado a un solo reservorio en términos de valor óptimo y solidez distributiva.

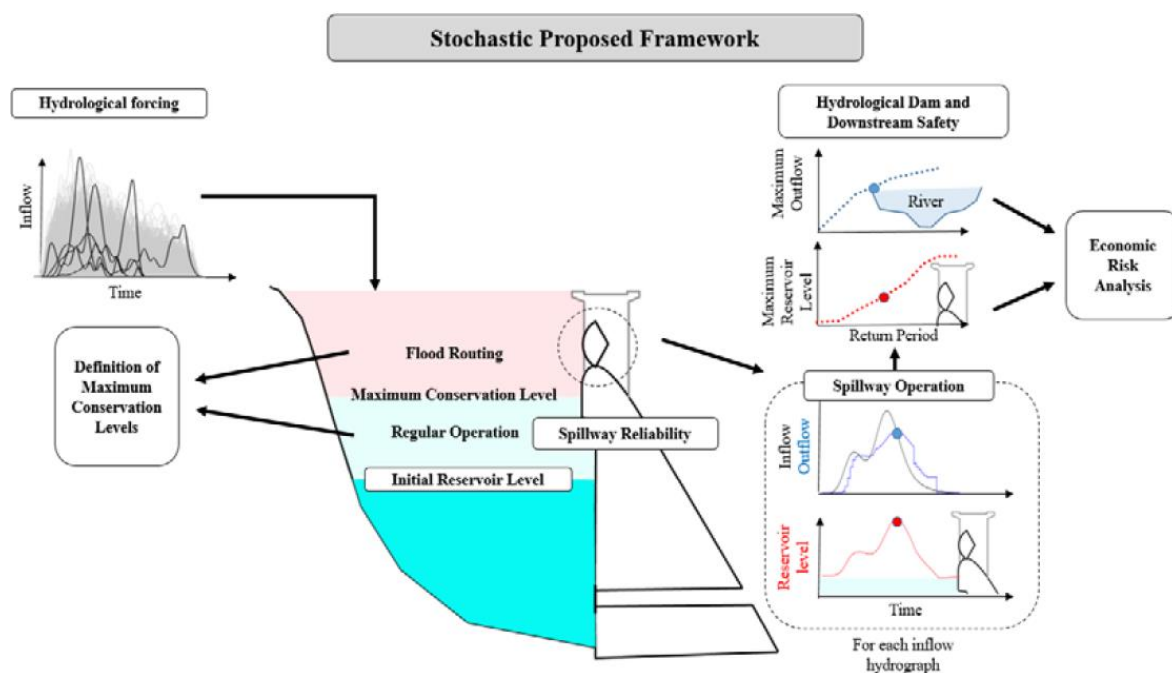
Moreno, A. (2008) diagnostica la situación en las obras de control y medición de agua por bloques de riego en el valle jequetepeque regulado, desarrolla a su vez la participación que deben tener las entidades involucradas y los beneficiarios. Lo interesante del diagnóstico, realiza un árbol de problemas y hace un análisis de los medios y fines para presentar soluciones alternativas, para ello, su trabajo realiza un análisis de la sensibilidad y sostenibilidad del riego regulado, evalúa el impacto ambiental y establece un plan de implementación de gestión del recurso del agua.

Rojas, G. (2008) presenta un trabajo de gestión integrada de la cuenca de Jequetepeque y Zaña para el desarrollo de 66,000 ha de tierras en los valles. Describe las obras realizadas en infraestructura hidráulica y las conexas. En su trabajo reseña la Presa Gallito Ciego, su operación y mantenimiento para cautelar el uso regulado del agua, y a su vez de operar y mantener las obras hidráulicas mayores. Así mismo, este proyecto muestra las acciones preventivas con promover las defensas ribereñas, la protección de laderas, mediante forestación, uso racional de la agricultura.

La tesis doctoral de Gabriel Martín, Iván (2020), representa una contribución significativa en el campo de la modelación estocástica aplicada a la gestión de riesgos hidrológicos, particularmente en lo que respecta a la generación estocástica de crecidas, la operación de órganos de desagüe en situaciones de crecida, el análisis de la influencia de variables operacionales y la definición de resguardos estacionales en presas. La importancia de este trabajo radica en su capacidad para mejorar la seguridad hidrológica de las grandes presas, así como para adaptar las existentes a los nuevos criterios exigidos por las regulaciones y normativas actuales. Uno de los principales enfoques de esta investigación es el desarrollo de una metodología robusta para la generación estocástica de crecidas. Dado que las variables hidrológicas pueden exhibir comportamientos aleatorios, es fundamental contar con herramientas que permitan simular de manera precisa y realista la ocurrencia de eventos extremos, como las crecidas. La propuesta de Martín se basa en modelos distribuidos físicamente que incorporan generadores estocásticos, lo que permite tener en cuenta la variabilidad inherente de los procesos hidrológicos. Además, la tesis aborda la operación de los órganos de desagüe en situaciones de crecida, lo que es crucial para garantizar la seguridad y la estabilidad de las presas. La operación adecuada de estos órganos puede reducir el riesgo de inundaciones aguas abajo y minimizar el impacto de eventos extremos. Martín desarrolla y analiza métodos operativos de control de inundaciones, considerando variables como el nivel inicial del embalse y la probabilidad de fallo de los órganos de desagüe. Esta evaluación detallada de los diferentes escenarios operativos contribuye significativamente a mejorar la capacidad de respuesta ante eventos hidrológicos adversos. Asimismo, la tesis examina la influencia de variables operacionales en la seguridad hidrológica de las presas, como la probabilidad de falla de los aliviaderos. Estos elementos son críticos para garantizar la integridad estructural de las presas y prevenir posibles desbordamientos. La inclusión de estas variables en el análisis

estocástico proporciona una evaluación más completa y realista de los riesgos asociados a las operaciones de las presas. Otro aspecto destacado de esta investigación es la definición de resguardos estacionales en presas, que tiene en cuenta la operación ordinaria de las mismas. Esta estrategia busca mitigar los riesgos asociados a eventos hidrológicos estacionales, como las crecidas durante la temporada de lluvias. La propuesta de Martín presentada en esquema en la Figura 4, ofrece un enfoque metodológico sólido para determinar los niveles de resguardo adecuados, considerando tanto la seguridad de la presa como la optimización de los recursos hídricos disponibles.

Figura 4 Esquema general del enfoque metodológico estocástico propuesto en esta tesis (Gabriel, 2020)

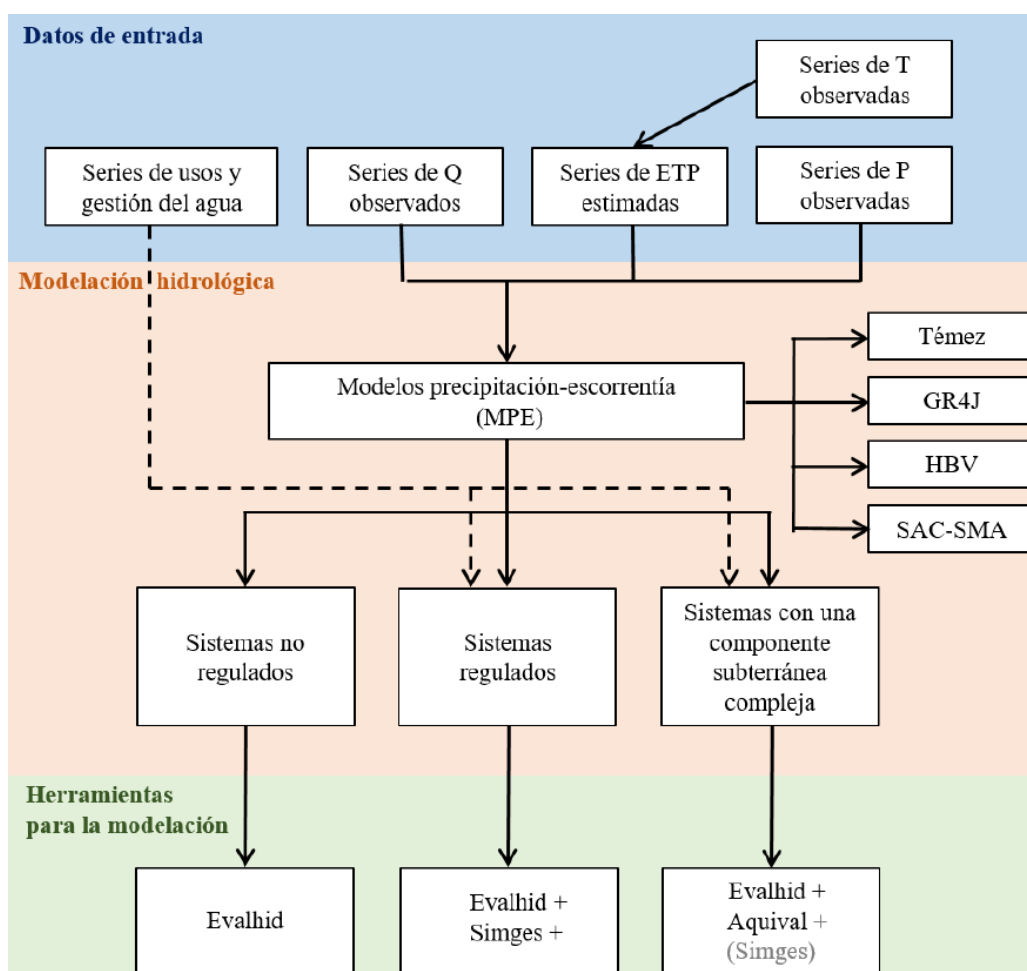


La revisión realizada por García Romero (2020) abarca una amplia gama de modelos de cuencas, clasificándolos según su conceptualización, la naturaleza de los algoritmos utilizados y su representación espacial. Este enfoque multidimensional permite una comprensión más completa de las herramientas disponibles para la gestión de sistemas de recursos hídricos y destaca la importancia de considerar diversos aspectos en el

desarrollo y la aplicación de modelos hidrológicos. Una de las contribuciones clave de la tesis de García Romero es su abordaje del problema de evaluación de recursos hídricos utilizando modelos hidrológicos, particularmente modelos de precipitación-escorrentía (MPE). Estos modelos son fundamentales para la evaluación de recursos hídricos en diferentes condiciones, desde cuencas no reguladas hasta sistemas altamente regulados y aquellos con una fuerte influencia de la componente subterránea. En el contexto de la presente tesis, resulta especialmente relevante el estudio de sistemas regulados, ya que García Romero no solo se limita a la formulación de modelos hidrológicos, como sucede en muchos trabajos previos, sino que también propone un conjunto de experimentos para analizar los aspectos más importantes de la modelación hidrológica en la evaluación de recursos hídricos. Entre estos aspectos se incluye la selección del mejor modelo hidrológico, la influencia de la escala temporal, las técnicas de calibración automática y la influencia de la función objetivo. Es importante destacar que estos análisis se realizan tanto en sistemas con hidrología natural como en aquellos altamente modificados por la actividad humana, donde el régimen natural ha sido alterado significativamente. Este último caso es de particular interés para la aplicación del caudal regulado, donde la gestión humana del sistema tiene un impacto sustancial en el caudal observado. La Figura 5 presenta una representación visual de estos conceptos, resaltando la complejidad y la interacción entre los diferentes elementos involucrados en la modelación hidrológica para la evaluación de recursos hídricos en sistemas regulados. La tesis de García Romero representa un avance significativo en el campo de la evaluación de recursos hídricos, al proporcionar un enfoque integral que aborda tanto las condiciones naturales como las influenciadas por la actividad humana. Además, su énfasis en la selección y evaluación de modelos hidrológicos, junto con la consideración de aspectos como la escala temporal y las técnicas de calibración, contribuye a mejorar la precisión y la robustez de los análisis

hidrológicos, lo que es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos en el contexto actual de cambio climático y crecimiento poblacional.

Figura 5 Diagrama metodológico general. T = temperatura, P =Precipitación, ETP=Evapotranspiración potencial y Q= caudales. (García, 2020)



La contribución de Montes Marroyo (2019) es fundamental para el análisis y la estimación de crecidas mediante la aplicación de la teoría de la probabilidad y la combinación estocástica en simulaciones hidrometeorológicas. Su enfoque se basa en el desarrollo de un modelo hidrometeorológico que emplea técnicas avanzadas como el análisis de componentes principales, la correlación canónica y el agrupamiento cluster. Estas metodologías permiten estudiar la incertidumbre asociada a los cuantiles estimados mediante simulaciones de Monte Carlo, así como modelizar de manera directa y conjunta

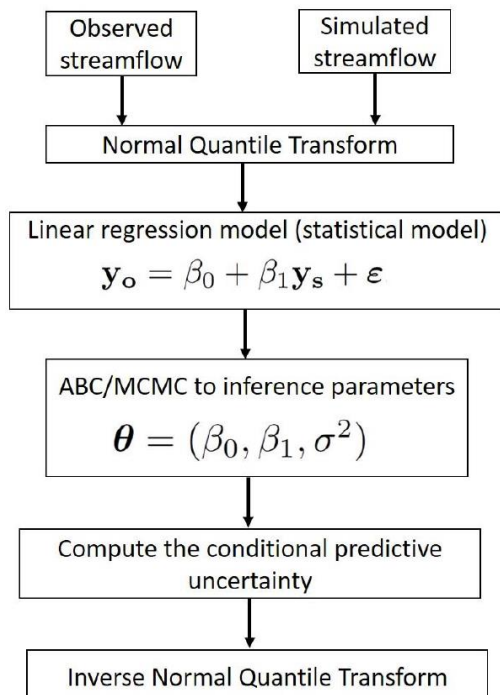
la distribución espacial y temporal de las precipitaciones sobre la cuenca. El autor reconoce la importancia de los generadores estocásticos para alimentar modelos hidrometeorológicos de simulación continua, pero también destaca el alto coste computacional asociado a estos métodos. Por ello, propone alternativas semi-continuas para el análisis de crecidas y los procesos físicos que las generan, lo que permite obtener resultados precisos con un menor requerimiento computacional. Además, Montes Marroyo incorpora una amplia gama de información hidrológica en su análisis. Esta información incluye registros de niveles de agua y caudales en estaciones de aforo, registros de caudales evacuados por embalses y datos de precipitación, temperatura y otras variables climáticas obtenidos a través de estaciones meteorológicas o dispositivos de teledetección. También se consideran datos sobre mantos de nieve acumulados, niveles de masas de agua superficiales y acuíferos subyacentes, así como información sobre la tipología y usos del suelo y características fisiográficas de la cuenca.

Esta amplia variedad de información permite una caracterización detallada de las condiciones hidrológicas y climáticas de la cuenca, lo que es fundamental para el desarrollo de modelos hidrometeorológicos precisos y la estimación precisa de crecidas. Además, la integración de datos heterogéneos de múltiples fuentes garantiza una representación completa y robusta de los procesos hidrológicos en la cuenca, lo que mejora la capacidad de los modelos para predecir y gestionar los riesgos asociados a las crecidas.

En resumen, la metodología propuesta por Montes Marroyo representa un enfoque avanzado y completo para el análisis y la estimación de crecidas, que combina técnicas estadísticas y estocásticas con una amplia gama de información hidrológica y climática. Esta aproximación proporciona una base sólida para la gestión de riesgos hidrológicos y la toma de decisiones en el ámbito de la ingeniería hidráulica y la gestión de recursos hídricos.

Romero (2019) evalúa la incertidumbre predictiva condicional de los caudales mensuales en virtud de apoyar la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. Propone un método para caracterizar, cuantificar, reducir y comunicar la incertidumbre predictiva con un modelamiento hidrológico difícil por la complejidad en la escasa información en cuencas no aforadas. El aporte significativo está en el intercambio de la función de la verosimilitud por el uso de resúmenes estadísticos y datos simulados, demostrando la similitud de la distribución predictiva estimada por un método exacto o aproximado. La tesis desarrolla una vasta explicación de las técnicas para cuantificar la incertidumbre total, como modelos de Model OutPut Statistics (MOS), Hydrological Uncertainty Processor (HUP), Bayesian Model Average (BMA), Model Conditional Processor (MCP), Bayesian Joint Probability (BJP) y aproximación meta gaussiano. Los modelos son estudiados y adecuados para la propuesta de Approximate Bayesian Computation (ABC) y Markov Chain Monte Carlo (MCMC). (Figura 6)

Figura 6 Diagrama de flujo del proceso para derivar la distribución de incertidumbre predictiva condicional. (Romero, 2019)



Martínez (2019) propone un modelo matemático y de simulación numérica de los flujos superficiales en las cuencas bajas de ríos basado en los datos de caudales, de los cuales se analizan los riesgos de crecidas. El modelo matemático parte de las ecuaciones de Navier – Stokes y método de volúmenes finitos para la dinámica de fluidos. La tesis realiza un análisis hidrogeomorfológico, esto quiere decir, un análisis climático, hidrográfico, hidrológico sobre una cuenca. Además, la simulación numérica para analizar el caudal medio y el máximo instantáneo para un horizonte de tiempo, facilitan la toma de medidas no estructurales a través de predicción, plan de emergencias y la comunicación, y las medidas estructurales.

La tesis de Martínez (2018) representa un avance significativo en el estudio hidromorfológico de los ríos y las estrategias de gestión del recurso hídrico para conservar y mejorar las condiciones de las masas de agua. El autor aborda de manera integral la problemática de los ríos afectados por presiones antrópicas, como la regulación de los caudales, y propone metodologías innovadoras para analizar y abordar estos desafíos. La tesis se centra en caracterizar la estructura fluvial a través de un diagnóstico detallado que identifica las medidas necesarias para revertir la degradación observada. Utilizando criterios estadísticos, Martínez realiza un análisis comparativo entre enfoques determinísticos y estocásticos para entender las respuestas biogeomorfológicas de los ríos frente a la regulación de caudales impuesta por grandes presas y embalses. Uno de los aspectos destacados de la investigación es el empleo de metodologías automáticas de segmentación de los cursos fluviales. Esto permite una caracterización más precisa de la morfología y dinámica de los ríos, facilitando la identificación de cambios y la evaluación de su impacto ambiental. Además, se consideran múltiples escalas espaciales y temporales para comprender la complejidad de los procesos fluviales y su evolución a lo largo del tiempo. El autor también recurre a técnicas avanzadas de modelización fluvial que integran

la dinámica geomorfológica del cauce con el desarrollo de la vegetación. Esta aproximación holística permite no solo comprender los procesos físicos que afectan a los ríos, sino también prever posibles trayectorias futuras de evolución. De esta manera, se puede diseñar estrategias de gestión más efectivas y sostenibles que promuevan la conservación y restauración de los ecosistemas fluviales.

Además de su enfoque metodológico innovador, la tesis de Martínez contribuye al avance del conocimiento en el campo de la hidromorfología fluvial al proporcionar insights fundamentales sobre la interacción entre la regulación de caudales y la morfología de los ríos. Estos hallazgos son de gran relevancia para la toma de decisiones en la gestión del agua y la planificación del uso del territorio, especialmente en contextos donde la presión humana sobre los recursos hídricos es elevada.

1.2 Base Teórica

1.2.1 Embalses y presas

Según **Yali (2018)**, describe el embalse y la presas en función del reservorio Gallito Ciego.

Embalses

Los lagos y reservorios naturales son componentes vitales del sistema hidrológico terrestre, con un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua y la provisión de recursos hídricos para ecosistemas y comunidades humanas. Representan depósitos estratégicos que almacenan aproximadamente dos tercios del agua superficial y atmosférica de la Tierra. La gestión efectiva de estos cuerpos acuíferos es esencial para adaptarse a la variabilidad climática y mitigar los impactos de eventos extremos, como sequías e inundaciones.

En este contexto, los embalses emergen como una herramienta clave en la gestión del agua, ofreciendo una serie de beneficios multifacéticos. Los embalses son cuerpos de agua retenidos en un vaso topográfico mediante la ingeniería hidráulica, ya sea de manera natural o artificial. Su diseño puede ser monopropósito, enfocado en una función específica, o multipropósito, con la capacidad de cumplir varias funciones simultáneas. Entre sus funciones destacadas se incluyen la regulación del caudal de ríos y arroyos, el almacenamiento de agua durante períodos húmedos y su liberación estratégica durante períodos secos para satisfacer diversas necesidades, como el riego agrícola, el abastecimiento de agua potable y la generación de energía hidroeléctrica.

La regulación del caudal es una de las funciones más importantes de los embalses. Esta capacidad permite controlar el flujo de agua para evitar inundaciones durante los períodos de alta precipitación y asegurar un suministro constante durante las épocas de sequía. Los embalses actúan como amortiguadores que almacenan el exceso de agua durante las lluvias intensas y lo liberan gradualmente cuando la demanda aumenta o el suministro natural disminuye.

Figura 7 Reservorio Gallito Ciego, Cajamarca. (PEJEZA, s.f.)



El almacenamiento de agua en embalses durante los períodos húmedos es esencial para garantizar el suministro durante los períodos secos. Esta función es particularmente vital para la agricultura, donde el riego constante es necesario para mantener la productividad de los cultivos. Además, los embalses son fundamentales para el abastecimiento de agua potable a las comunidades, asegurando un suministro constante incluso en épocas de escasez.

La generación de energía hidroeléctrica es otro beneficio clave de los embalses. Al aprovechar la energía cinética del agua en movimiento, las plantas hidroeléctricas pueden producir electricidad de manera sostenible y con bajas emisiones de carbono. Esto no solo ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático.

Además de estos beneficios directos, los embalses también pueden tener impactos positivos en la gestión de recursos hídricos a largo plazo. Por ejemplo, la capacidad de almacenamiento de agua de los embalses puede ayudar a suavizar los efectos de la variabilidad climática y garantizar un suministro constante durante períodos de escasez. Esto es especialmente importante en regiones donde el cambio climático está aumentando la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos.

Sin embargo, a pesar de sus numerosos beneficios, los embalses también plantean desafíos y preocupaciones significativas. La construcción de embalses puede tener impactos ambientales importantes, incluida la pérdida de hábitats naturales, la alteración de ecosistemas fluviales y la fragmentación de paisajes. Además, los embalses pueden generar controversias sociales, especialmente cuando implican la reubicación de comunidades o la inundación de tierras agrícolas o áreas protegidas.

Por lo tanto, es crucial abordar estos desafíos y preocupaciones de manera integral en la planificación y gestión de embalses. Esto incluye la realización de evaluaciones de

impacto ambiental exhaustivas antes de la construcción, la implementación de medidas de mitigación para reducir los impactos negativos y la consulta activa y la participación de las comunidades locales en el proceso de toma de decisiones.

Además, con el avance de la tecnología y la innovación, se están desarrollando nuevas soluciones para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los embalses. Por ejemplo, la implementación de sistemas avanzados de gestión del agua y el uso de tecnologías de monitoreo remoto pueden optimizar la operación de los embalses y permitir una respuesta más rápida a las variaciones en la disponibilidad de agua y las demandas de los usuarios. Del mismo modo, la investigación en materiales y técnicas de construcción puede contribuir a la construcción de embalses más seguros y duraderos.

Presas

Las presas son estructuras fundamentales en la gestión del agua, diseñadas para embalsar y regular el flujo de agua en los cursos fluviales con el fin de optimizar su aprovechamiento y distribución. Su función principal es elevar el nivel del agua para crear un embalse que pueda ser utilizado para diversos propósitos, como el suministro de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica, el riego agrícola y la prevención de inundaciones.

Estas estructuras se pueden clasificar de varias formas, siendo el material de construcción uno de los criterios más importantes. Las presas de tierra, también conocidas como presas de terraplén, son uno de los tipos más antiguos y comunes de presas. Consisten en la acumulación de suelo, roca y otros materiales naturales para crear una barrera que retenga el agua. Este tipo de presas fueron ampliamente utilizadas en la antigüedad debido a su disponibilidad y facilidad de construcción. Aunque inicialmente se construyeron con métodos rudimentarios, hoy en día se emplean técnicas y materiales modernos para mejorar su estabilidad y durabilidad.

Aunque las presas de tierra tienen menos exigencias en términos de rigidez y deformabilidad en comparación con otros tipos de presas, siguen siendo sujetas a una serie de consideraciones técnicas y de seguridad. Por ejemplo, es crucial garantizar la estabilidad del terraplén y prevenir la erosión del suelo para evitar posibles filtraciones o rupturas que puedan comprometer la integridad de la estructura y causar inundaciones catastróficas aguas abajo. Además, la planificación cuidadosa de la gestión del agua en el embalse es esencial para minimizar los riesgos asociados con la operación de la presa y garantizar un uso sostenible de este recurso vital.

1.2.2 Métodos de caracterización hidrológica

Para caracterizar el forzamiento hidrológico, es fundamental entender los distintos métodos disponibles, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. Gabriel (2020) destaca dos enfoques principales: el análisis estadístico de frecuencia de inundaciones y los métodos de simulación de frecuencia de crecidas derivados.

El análisis estadístico de frecuencia de inundaciones se basa en el procesamiento de datos de flujo locales y regionales mediante procedimientos estadísticos, como el ajuste de distribuciones. Este método aprovecha referencias históricas siempre que estén disponibles, permitiendo una estimación de la frecuencia de inundaciones en función de datos pasados. Sin embargo, su precisión puede verse limitada por la disponibilidad y la calidad de los datos históricos.

Por otro lado, los métodos de simulación de frecuencia de crecidas derivados utilizan modelos hidrológicos para generar hidrogramas, a partir de los cuales se puede derivar una distribución de frecuencia de crecidas. Este enfoque proporciona una herramienta más dinámica y adaptable, ya que permite simular una amplia gama de escenarios hidrológicos, incluso en ausencia de datos históricos extensos. Sin embargo,

requiere un mayor nivel de sofisticación técnica y la disponibilidad de datos precisos para calibrar y validar los modelos hidrológicos.

En cuanto al enfoque basado en la frecuencia, tanto en inundaciones como en caudales, se emplean dos métodos principales: la simulación continua y los métodos basados en eventos estocásticos. La simulación continua modela el flujo de manera continua a lo largo del tiempo, mientras que los métodos basados en eventos estocásticos se centran en la ocurrencia de eventos individuales, lo que puede ser especialmente útil para capturar la incertidumbre asociada con eventos extremos.

En resumen, la elección del método adecuado para caracterizar el forzamiento hidrológico depende de diversos factores, incluida la disponibilidad de datos, la precisión requerida y la complejidad del sistema hidrológico en estudio. Es fundamental evaluar cuidadosamente estas consideraciones para seleccionar el enfoque más apropiado en cada caso específico.

1.2.3 Tipos de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos desempeñan un papel crucial en la comprensión y gestión de los recursos hídricos, permitiendo simular el comportamiento de los sistemas hidrológicos bajo diferentes condiciones y escenarios. García Romero (2020) identifica dos categorías generales de modelos hidrológicos: modelos físicos y modelos abstractos. Los modelos físicos representan el sistema a una escala reducida, mientras que los modelos abstractos utilizan ecuaciones matemáticas para describir el sistema.

En función de las características de simplificación del sistema, los modelos hidrológicos pueden clasificarse de diversas formas. Una clasificación importante se basa en si consideran o no la aleatoriedad del sistema, dividiéndolos en determinísticos y estocásticos. Los modelos determinísticos no tienen en cuenta la aleatoriedad y producen la misma salida para una misma entrada, generalmente basados en series de datos históricos.

Por otro lado, los modelos estocásticos, aunque carecen de una base física, incorporan la aleatoriedad en sus resultados, utilizando series probabilísticas para representar la variabilidad inherente del sistema.

Otra clasificación relevante se basa en la discretización espacial de la cuenca, dividiendo los modelos en agregados, distribuidos y semidistribuidos. Los modelos agregados consideran la cuenca como homogénea, ignorando la variabilidad espacial interna. En contraste, los modelos distribuidos discretizan la cuenca en una malla homogénea para capturar la variabilidad interna. Los modelos semidistribuidos son una versión más fina de los agregados, discretizando la cuenca en subzonas con características hidrológicas propias.

Cada tipo de modelo tiene sus ventajas y limitaciones. Los modelos determinísticos son computacionalmente eficientes, pero pueden perder precisión al no considerar la aleatoriedad. Los modelos estocásticos capturan mejor la incertidumbre, pero pueden requerir datos más detallados y recursos computacionales adicionales. Los modelos distribuidos ofrecen una representación más precisa de la variabilidad espacial, pero pueden ser computacionalmente intensivos. Los modelos semidistribuidos ofrecen un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional al permitir una mayor discretización de la cuenca sin la complejidad de los modelos distribuidos.

En la conceptualización de los modelos hidrológicos, se distinguen dos enfoques principales: los modelos conceptuales y los modelos de base física. García Romero (2020) proporciona una visión general de estas dos categorías, destacando sus características y aplicaciones en la modelización hidrológica.

Los modelos conceptuales se caracterizan por su flexibilidad y simplicidad en la representación del sistema hidrológico. A diferencia de los modelos de base física, no están estrictamente ligados a la estructura formal del conocimiento, lo que les permite desarrollar

funciones de transferencia propias para reproducir ciertas etapas del ciclo hidrológico. Estos modelos suelen representar el sistema a través de almacenamientos o depósitos que se relacionan entre sí, realizando balances de agua en cada uno de ellos. Por lo general, los modelos conceptuales tienden a ser modelos agregados, lo que significa que simplifican la cuenca como un único sistema homogéneo, sin tener en cuenta la variabilidad espacial interna.

Por otro lado, los modelos de base física se fundamentan en los principios y leyes físicas que rigen el transporte del agua en la atmósfera, en la superficie del terreno y a través de medios porosos. Estos modelos se formulan mediante ecuaciones diferenciales ordinarias o en derivadas parciales que gobiernan cada proceso hidrológico, lo que los hace considerablemente más complejos que los modelos conceptuales. Requieren una gran cantidad de datos y parámetros físicos para su calibración y validación, los cuales pueden obtenerse en parte a través de experimentos de laboratorio o mediciones de campo.

Al seleccionar un modelo de cuenca, es crucial encontrar un equilibrio entre la complejidad del modelo y la precisión de la representación. Un modelo demasiado simple puede no capturar adecuadamente la dinámica del sistema, mientras que un modelo demasiado complejo puede requerir recursos computacionales y datos que no están disponibles o son difíciles de obtener. Por lo tanto, el desarrollo de un modelo de cuenca eficaz implica una comprensión profunda del sistema hidrológico, así como un manejo matemático adecuado y necesario para equilibrar la complejidad y la exactitud de la representación.

1.2.4 Distribuciones estadísticas

Según el trabajo de **Guasch, A., Piera, M., Casanovas, J. y Figueras, J. (2002)**, se presentan las funciones de distribución aplicado a procesos logísticos de fabricación y servicios.

Función de distribución Gamma

El proceso de modelado del tiempo necesario para realizar operaciones repetitivas en unidades de producción o actividades de transporte entre estaciones de trabajo es

fundamental para la planificación eficiente de procesos industriales. Según García Romero (2020), este tiempo tiende a seguir un valor constante con pequeñas variaciones, aunque estas pueden ser modeladas de manera más eficiente mediante enfoques estadísticos debido a la presencia de ciertos aspectos físicos que introducen cierta aleatoriedad en el proceso.

La modelización del tiempo de procesamiento o transporte entre estaciones de trabajo suele realizarse a través de funciones de densidad de probabilidad (fdp) como la fdp gamma. Aunque la fdp gamma comparte similitudes con la fdp normal en su distribución, presenta una asimetría que refleja la presencia de datos con valores superiores al promedio. Esta asimetría permite capturar la naturaleza de secuencias de actividades realizadas en paralelo, donde cada actividad individual puede seguir una distribución normal, pero el tiempo total consumido en la secuencia muestra un sesgo hacia valores superiores a la media.

Figura 8 Ficha técnica de la función de distribución gamma. (Guasch et al, 2002).

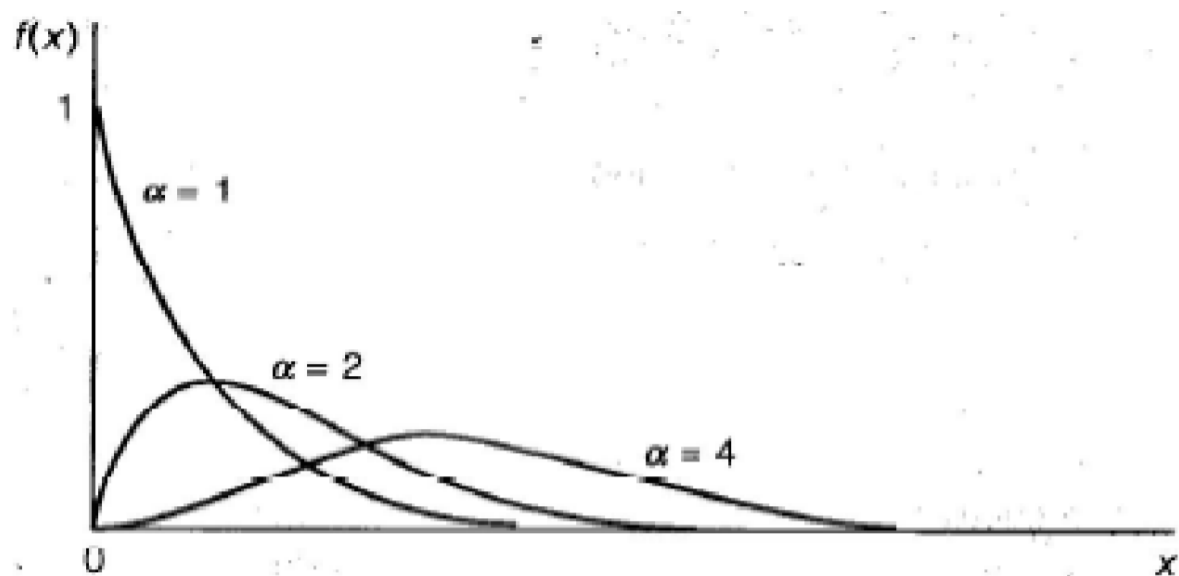
Gamma	$Gamma(\alpha, \beta)$
Densidad de probabilidad	$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(\alpha)} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ <p>$\Gamma(\alpha)$ es la función gamma</p> $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ <p>si α es entero positivo $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$</p>
Distribución acumulativa	$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-x/\beta} \sum_{j=0}^{\alpha-1} \frac{(x/\beta)^j}{j!} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ <p>si α es entero positivo; en caso contrario no hay formula cerrada</p>
Media	$\alpha\beta$
Variancia	$\alpha\beta^2$

Este enfoque estadístico proporciona una representación más precisa de la variabilidad inherente en los procesos industriales, lo que permite una planificación más

efectiva y una asignación adecuada de recursos. Por ejemplo, en una línea de producción donde múltiples unidades están realizando tareas de procesamiento simultáneas, la fdp gamma puede utilizarse para modelar el tiempo total necesario para completar todas las operaciones, teniendo en cuenta las posibles variaciones en el tiempo de procesamiento de cada unidad.

Además, la utilización de modelos estadísticos como la fdp gamma permite identificar patrones y tendencias en los datos de tiempo de procesamiento o transporte, lo que puede ser útil para optimizar la eficiencia de los procesos y mejorar la productividad. Por ejemplo, mediante el análisis de la distribución de tiempos de procesamiento, los gerentes pueden identificar cuellos de botella en la línea de producción y tomar medidas para mejorar la fluidez del proceso y reducir los tiempos de espera.

Figura 9 Función de distribución gamma ($\beta=1$). (Guasch et al, 2002).



La Figura 9 presentada representa una línea de producción donde cada operación de procesamiento puede ser realizada por cualquiera de las unidades asignadas a esa operación. En este escenario, la ocurrencia de una avería en una de las máquinas puede

provocar un aumento en el tiempo total requerido para completar todas las operaciones, ya que el número de máquinas operativas disminuye. Este fenómeno resalta una característica importante de los procesos industriales: la variabilidad en el tiempo de producción debido a eventos imprevistos como averías.

Cuando ocurre una avería en una de las máquinas, se interrumpe temporalmente la secuencia de actividades en la línea de producción, lo que resulta en un retraso en el tiempo total requerido para completar todas las operaciones. Este retraso afecta no solo a la operación afectada por la avería, sino también a todas las operaciones posteriores en la línea de producción. Por lo tanto, es probable que el tiempo total de producción aumente significativamente en comparación con el tiempo promedio esperado.

Esta variación en el tiempo de producción debido a averías se refleja en una distribución asimétrica de los tiempos de finalización de la secuencia de actividades. Es decir, el número de veces que se completa la secuencia de actividades en un tiempo mayor que el valor promedio es mayor que el número de veces que se completa en un tiempo inferior al valor promedio. Esta asimetría sugiere que los eventos que causan retrasos tienden a tener un impacto más pronunciado en el tiempo total de producción que los eventos que aceleran el proceso.

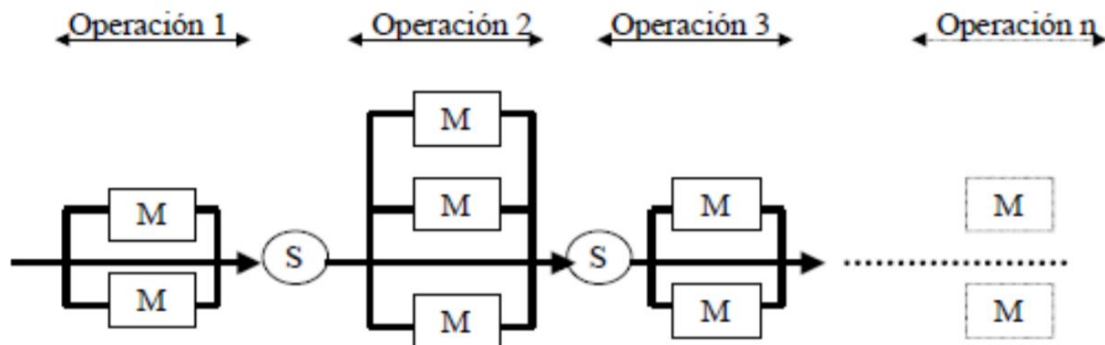
Para mitigar los efectos negativos de las averías en la producción, las empresas suelen implementar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, así como planes de contingencia para minimizar los tiempos de inactividad y maximizar la disponibilidad de las máquinas. Además, la utilización de técnicas de programación y planificación avanzadas puede ayudar a optimizar la asignación de recursos y reducir los tiempos de espera en caso de averías.

La función de distribución gamma, como menciona García Romero (2020), es una herramienta estadística valiosa para modelar sistemas reales donde ciertos eventos, como

las averías de las máquinas en una línea de producción, pueden provocar un aumento en los tiempos de finalización de las actividades por encima del valor promedio esperado. Esta distribución es especialmente útil para capturar la variabilidad en los tiempos de finalización de actividades en presencia de eventos imprevistos que afectan el rendimiento del sistema.

La naturaleza asimétrica de la distribución gamma permite modelar con precisión la ocurrencia de valores superiores al promedio, lo que refleja la tendencia de los eventos disruptivos, como las averías, a causar retrasos significativos en el proceso de producción. Al incorporar esta asimetría en el modelo, se puede obtener una representación más realista de la variabilidad en los tiempos de finalización de las actividades, lo que facilita la toma de decisiones y la planificación de recursos en entornos industriales.

Figura 10 Línea de producción. (Guasch et al, 2002).



Función de distribución Normal

La función de distribución normal es ampliamente utilizada en la modelización de sistemas donde los datos muestran una distribución simétrica alrededor del valor promedio y la mayoría de los datos se concentran cerca de este valor. Como menciona García Romero (2020), aproximadamente el 70% de los datos muestreados en una distribución normal se encuentran dentro de una distancia de una desviación estándar (σ) del valor promedio (μ). Esto refleja la tendencia de los datos a distribuirse de manera uniforme

alrededor del valor promedio, lo que hace que la función de distribución normal sea especialmente útil para modelar sistemas donde la variabilidad de los datos es mínima y los eventos extremos son poco probables.

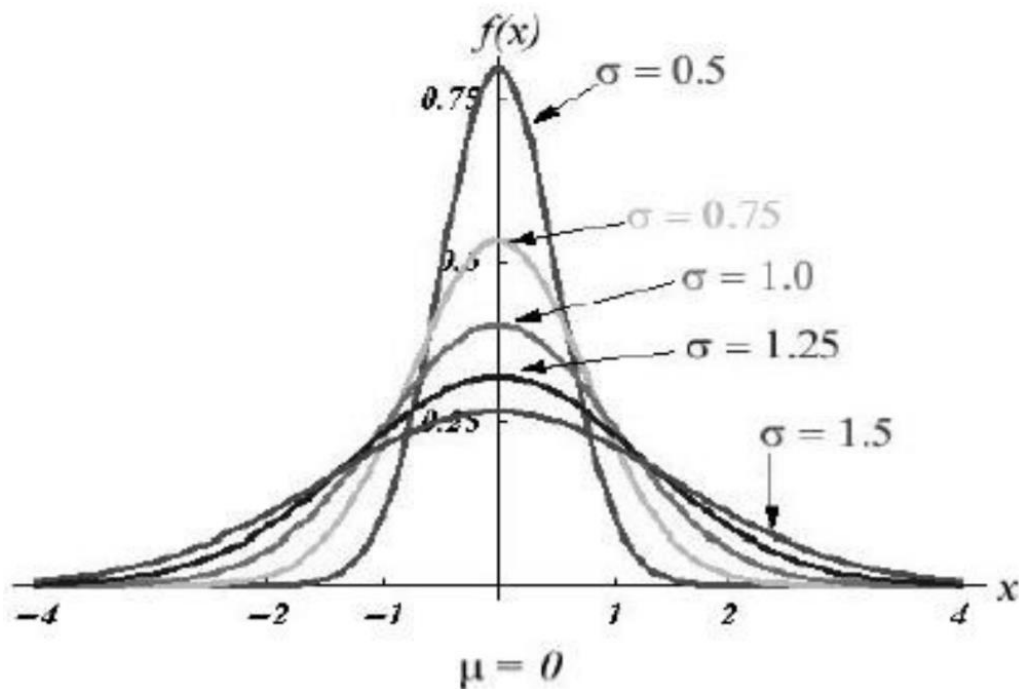
Un ejemplo común de aplicación de la función de distribución normal es en la modelización del tiempo de producción de las máquinas cuando no se consideran fallos o errores. En este caso, la distribución normal puede utilizarse para representar el tiempo de producción esperado, asumiendo que la mayoría de las veces el tiempo de producción se sitúa cerca del valor promedio sin grandes variaciones.

En la Figura 11 se representa un histograma de una función de distribución normal, donde se observa que los datos prácticamente no presentan grandes variaciones respecto al valor promedio. Esta representación gráfica ilustra la distribución uniforme de los datos alrededor del valor promedio, lo que es característico de la distribución normal y muestra su utilidad en la modelización de sistemas donde la variabilidad es mínima.

Figura 11 Ficha técnica de la función de distribución normal. (Guasch et al, 2002).

Normal	$N(\mu, \sigma^2)$
Densidad de probabilidad	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2}$
Distribución acumulativa	No existe fórmula cerrada
Media	μ
Variancia	σ^2

Figura 12 Función de distribución normal. (Guasch et al, 2002).

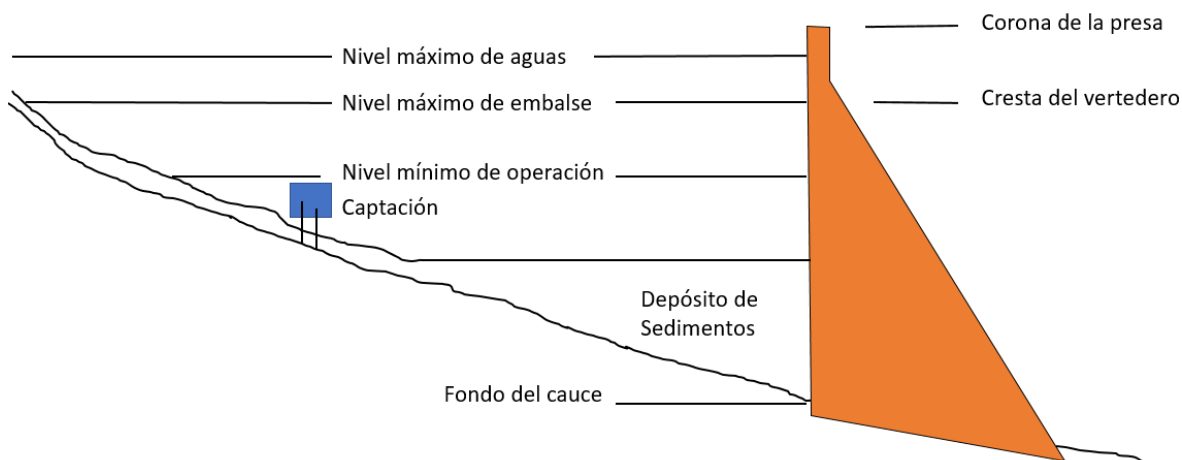


1.3 Definiciones Conceptuales

Respecto a la presa (Yali, 2018):

- El embalse útil está comprendido entre el Nivel Máximo de Embalse1 y el Nivel Mínimo de Operación.
- El Nivel Máximo de Operación es el nivel máximo con el que trabaja la presa, que es limitado la solera del aliviadero, buscando regular la descarga del caudal de aguas abajo y la sostenibilidad del embalse.
- La Altura de la presa se mide desde la Corona de la Presa y el Fondo del Cauce.
- La distancia que hay entre la Corona de la Presa y el Nivel Máximo de Aguas es el Borde Libre.
- Durante la vida útil de la obra, el agua en el embalse no debe superar el Nivel Máximo de Aguas, ni si quiera durante las crecidas extraordinarias.

Figura 13 Componentes principales de una presa (Yali, 2018)



1.4 Operacionalización de Variables

La operacionalización de las variables es como se muestra...

Tabla 1 Operacionalización de variables

Variab l es	Definición de la Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Dependiente (Y1): Producción de energía eléctrica	La cantidad de energía eléctrica generada por el embalse Gallito Ciego, medida en gigavatios hora (GWh), como resultado del uso eficiente del volumen útil y turbinado.	Cantidad de Energía Generada	<ul style="list-style-type: none"> Energía producida por mes (GWh/mes) 	Simulación de Eventos Discretos
Independiente (X1): Caudal regulado	El flujo controlado de agua del embalse Gallito Ciego, gestionado para satisfacer la demanda, minimizar pérdidas por evaporación y mantener el volumen útil, influenciando la capacidad de generación eléctrica.	Oferta Hídrica Demanda de Agua (masa regulada) Pérdidas por Evaporación Volumen Útil del Embalse Déficit y Superávit Caudal Turbinable	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de agua disponible al 75% (Hm³) Demanda bruta superficial mensual (Hm³/mes) Volumen de agua perdido por evaporación por mes (Hm³/mes) Volumen útil al inicio y fin de cada mes (Hm³) Volumen de déficit mensual (Hm³/mes) Volumen de superávit mensual (Hm³/mes) Caudal turbinable disponible (Hm³/hora) 	

1.5 Hipótesis

La hipótesis general es:

El comportamiento de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica del embalse Gallito Ciego puede ser analizado estocásticamente mediante la Simulación de Eventos Discretos, permitiendo predecir de manera precisa las variaciones en la oferta hídrica, demanda, pérdidas por evaporación y volumen útil del embalse, y optimizando así la producción de energía eléctrica.

Las hipótesis específicas son:

- El modelo matemático y la simulación del comportamiento estocástico del volumen útil del embalse Gallito Ciego, utilizando la Simulación de Eventos Discretos, pueden representar adecuadamente las fluctuaciones mensuales del volumen del embalse, considerando las variaciones en la oferta hídrica, demanda y pérdidas por evaporación.
- Los déficits y superávits de agua en el embalse Gallito Ciego tienen un impacto significativo en la demanda y capacidad de generación de energía, y estos impactos pueden ser cuantificados y mitigados eficazmente mediante la implementación de estrategias basadas en el análisis estocástico y la Simulación de Eventos Discretos.
- Los resultados del modelo lógico estocástico muestran una alta concordancia con los datos reales que con los proyectados del embalse Gallito Ciego, y el modelo lógico puede servir para ajustar los parámetros proyectados para dar mayor precisión y utilidad en la toma de decisiones en la gestión del embalse.

Capítulo II. Métodos y Materiales

En este capítulo se describe el tipo de investigación, el método empleado, el diseño de contrastación, la población, muestra y muestreo, así también las técnicas, instrumentos, equipos, materiales de recolección y procesamiento de datos respecto a la simulación por elementos discretos y el caudal regulado.

2.1 Tipo de Investigación

La investigación propuesta abarca diversos tipos de investigación, cada uno contribuyendo de manera única al alcance y comprensión del problema en estudio:

1. En función del propósito:

- Aplicada: La investigación se enfoca en abordar una situación real relacionada con los caudales regulados en el embalse de Gallito Ciego. Su objetivo es generar conocimiento que pueda aplicarse directamente en la gestión y toma de decisiones respecto al aprovechamiento de los recursos hídricos y la producción de energía eléctrica.

2. En función de su nivel de profundidad:

- Exploratoria: Se realiza una exploración detallada de los caudales regulados en el embalse, buscando comprender sus características y patrones de comportamiento.
- Descriptiva: Se caracterizan los fenómenos que influyen en la regulación de los caudales, proporcionando una descripción detallada de su naturaleza y variabilidad.
- Explicativa: Se busca dar explicación a las ocurrencias y comportamientos observados en los caudales regulados, identificando las causas subyacentes y las relaciones causales que los determinan.

3. En función de la naturaleza de datos e información:

- Cuantitativa: Se emplean datos numéricos directos y secundarios, como los registros históricos de los caudales diarios y regulados de la Central hidroeléctrica Gallito Ciego. Se utilizan medios de recolección de datos tanto de campo como documentales, permitiendo un análisis riguroso y basado en evidencia.

4. En función de la manipulación de variables:

- Experimental: Se manipulan variables relevantes para el estudio con el fin de comprender mejor los fenómenos analizados. Esto puede implicar la manipulación de parámetros relacionados con la regulación de los caudales y su impacto en la producción de energía eléctrica.

5. En función de la inferencia:

Analítico y estadístico: Se emplea un enfoque analítico y estadístico para interpretar los datos recopilados y realizar inferencias significativas sobre los fenómenos estudiados. Se utilizan modelos estocásticos para analizar la variabilidad y predecir comportamientos futuros de los caudales regulados, lo que permite una comprensión profunda de su dinámica y comportamiento en diferentes escenarios.

En conjunto, estos enfoques de investigación proporcionan una visión integral y rigurosa del problema de los caudales regulados en el embalse de Gallito Ciego, permitiendo una comprensión profunda de sus características, causas y efectos, así como la identificación de posibles soluciones y estrategias de gestión.

2.2 Método de Investigación

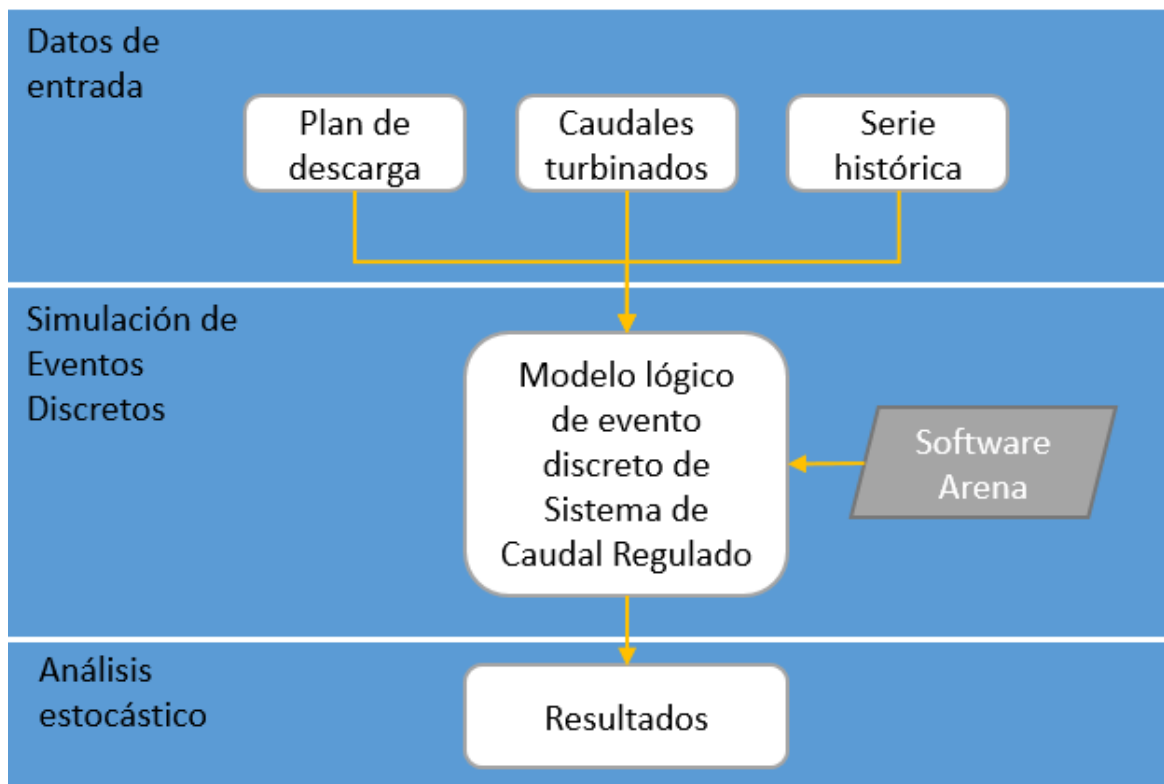
El método de investigación propuesto para este estudio se basa en un enfoque de análisis estocástico, el cual implica el análisis de fenómenos que exhiben un comportamiento aleatorio o probabilístico. Este método se fundamenta en la observación y análisis de datos con variabilidad inherente, como los registros históricos de caudales, planes de descarga, y caudales turbinados, entre otros.

El análisis estocástico se centra en comprender y modelar la incertidumbre asociada a estos fenómenos, reconociendo que los resultados pueden variar en función de diferentes condiciones y variables aleatorias. Esto implica trabajar con muestras de datos que reflejen la variabilidad observada en sistemas hidrológicos y energéticos, considerando resultados que pueden fluctuar en el tiempo y espacio de manera no determinista.

Para llevar a cabo este análisis, se empleará la Simulación de Eventos Discretos (SED), una técnica que permite modelar y simular el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo, considerando eventos discretos que ocurren en momentos específicos. La SED se basa en la representación de eventos individuales que ocurren de manera discreta en el tiempo, lo que permite capturar la dinámica de sistemas que evolucionan en función de eventos específicos y aleatorios.

Este enfoque de investigación ofrece varias ventajas. En primer lugar, permite una representación detallada y realista del comportamiento de los caudales regulados en el embalse de Gallito Ciego, considerando la variabilidad inherente de estos fenómenos. Además, la Simulación de Eventos Discretos ofrece la flexibilidad necesaria para explorar diferentes escenarios y condiciones, lo que permite evaluar el impacto de diversas variables y estrategias de gestión en la producción de energía eléctrica y el manejo de recursos hídricos.

Figura 14 Diagrama de propuesta metodológica general



2.3 Diseño de Contrastación

H_0 : Es factible modelar estocásticamente los caudales regulados para analizar las condiciones naturales que modifican la capacidad del caudal en río o cuenca hidrológica.

Tabla 2 Contrastación de hipótesis

	H_0 Verdadera	H_0 Falsa
Mantener H_0	Decisión Correcta NO ERROR	Decisión incorrecta ERROR TIPO I (β)
Rechazar H_0	Decisión incorrecta ERROR TIPO I (α)	Decisión correcta NO ERROR ($1-\beta$)

$$P(\text{rechazar } H_0 / H_0 \text{ es verdadera}) = \alpha \quad P(\text{aceptar } H_0 / H_0 \text{ es falsa}) = \beta$$

$$P(\text{rechazar } H_0 / H_0 \text{ es falsa}) = 1 - \beta = P$$

$$\alpha = 0.05$$

2.4 Población, Muestra y Muestreo

La población es el embalse de Gallito Ciego.

La muestra es la oferta hídrica en el Rio Jequetepeque 2022-2023, el balance hídrico 2022-2023, Volúmenes de agua captados por los usuarios con sistema propio de abastecimiento de agua 2022/2023 (caudales turbinados).

2.5 Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos

Para llevar a cabo el análisis estocástico de los caudales regulados en el embalse Gallito Ciego y su posterior simulación, se requiere la utilización de diversas técnicas, instrumentos, equipos y materiales de recolección de datos. Estos recursos son fundamentales para recopilar la información necesaria y llevar a cabo un estudio riguroso y efectivo. A continuación, se detallan los elementos utilizados en este proceso:

Técnicas de Recolección de Datos:

1. Registro de Precipitaciones: Se utiliza una estación hidrométrica para registrar las precipitaciones que suministran el recurso hídrico a los reservorios. Esta técnica permite obtener datos precisos sobre las condiciones climáticas que afectan el embalse Gallito Ciego y su capacidad de almacenamiento.
2. Medición de Demanda Bruta Superficial: Se emplea una técnica de medición para determinar la demanda bruta superficial del reservorio Gallito Ciego en Hectómetros Cúbicos (Hm³). Esta medida comprende el flujo de agua dentro del embalse y su disponibilidad para el turbinado.
3. Registro de Pérdidas por Evaporación: Se realizan mediciones para registrar las pérdidas del sistema mayor por evaporación en Hectómetros Cúbicos (Hm³). Estos datos son importantes para evaluar la eficiencia del embalse en la retención de agua y su impacto en la disponibilidad de caudales regulados.

4. Seguimiento de Déficit y Superávit: Se lleva a cabo un seguimiento del déficit y superávit en Hectómetros Cúbicos (Hm³), lo que permite evaluar la capacidad del embalse para satisfacer la demanda de agua y su disponibilidad para futuros usos.
5. Medición de Oferta Hídrica: Se registran los datos de oferta hídrica al 75% en Hectómetros Cúbicos (Hm³), que representa la masa hídrica disponible para el turbinado en el embalse. Estas mediciones son fundamentales para determinar la cantidad de agua disponible para la producción de energía eléctrica.
6. Medición de Volúmenes Útiles del Reservorio: Se realizan mediciones para determinar el volumen útil del reservorio al inicio y al final de cada mes en Hectómetros Cúbicos (Hm³). Estos datos son esenciales para evaluar la capacidad de almacenamiento del embalse y su variación a lo largo del tiempo.

Instrumentos y Equipos Utilizados:

1. Estación Hidrométrica: Se utiliza una estación hidrométrica para registrar las precipitaciones y otras variables climáticas relevantes. Esta estación está equipada con sensores y equipos de medición especializados.
2. Medidores de Demanda y Pérdidas: Se emplean medidores y equipos de medición para registrar la demanda bruta superficial, las pérdidas por evaporación y otros parámetros hidrológicos clave.
3. Instrumentos de Registro y Seguimiento: Se utilizan dispositivos de registro y seguimiento para registrar los datos de oferta hídrica, déficit, superávit y volúmenes útiles del reservorio de manera precisa y sistemática.

Materiales de Recolección de Datos:

1. Libretas de Campo: Se utilizan libretas de campo para tomar notas y registrar observaciones durante las actividades de recolección de datos en el terreno.

2. Lápices y Bolígrafos: Se emplean lápices y bolígrafos para registrar los datos en las libretas de campo y otros documentos de registro.
3. Dispositivos de Almacenamiento de Datos: Se utilizan dispositivos de almacenamiento de datos, como memorias USB o discos duros externos, para guardar los datos recopilados de manera segura y organizada.

2.6 Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento y análisis de datos de los caudales regulados para la producción de energía eléctrica en el embalse Gallito Ciego se llevará a cabo mediante simulación de eventos discretos con un enfoque estocástico. Esto implica la generación de eventos aleatorios que representen las condiciones hidrológicas y el comportamiento del embalse a lo largo del tiempo.

El proceso de simulación se realizará utilizando el software Arena 14, que ofrece capacidades avanzadas para modelar sistemas complejos y dinámicos. En este software, se desarrollará un modelo detallado del embalse Gallito Ciego, considerando todas las variables relevantes como la demanda bruta superficial, las pérdidas por evaporación, el déficit y el superávit de agua, el volumen útil del embalse, entre otros.

Una vez que se ha construido el modelo en Arena 14, se procederá a la simulación de eventos discretos. Esto implica la ejecución del modelo a lo largo de un período de tiempo determinado, durante el cual se generan eventos aleatorios que afectan las condiciones del embalse y los caudales regulados. Estos eventos pueden incluir variaciones en las precipitaciones, cambios en la demanda de agua, y otros factores que afectan la disponibilidad de agua y la producción de energía eléctrica.

Durante la simulación, se recopilarán datos detallados sobre el comportamiento del embalse y los caudales regulados en cada período de tiempo. Estos datos se analizarán

posteriormente para identificar patrones, tendencias y relaciones significativas que puedan influir en la producción de energía eléctrica.

El análisis de datos también puede incluir la evaluación de diferentes escenarios y condiciones, como la variación de la demanda de agua, cambios en las condiciones climáticas, y la implementación de diferentes estrategias de gestión del embalse. Esto permitirá comprender mejor el impacto de diversos factores en la producción de energía y tomar decisiones informadas para optimizar el funcionamiento del embalse y maximizar la producción de energía eléctrica.

Capítulo III. Implementación de la simulación estocástica

Este capítulo se enfoca en la aplicación práctica de la simulación discreta para modelar y comprender el comportamiento dinámico del embalse en diferentes condiciones.

En este contexto, se explorarán las diversas etapas de la simulación estocástica, desde la conceptualización del sistema hasta la implementación del modelo en el software ARENA. Se describirá detalladamente el esquema de simulación utilizado, que abarca aspectos clave como la evaporación, el turbinado del agua y los caudales regulados. Asimismo, se presentará el modelo lógico desarrollado para representar fielmente el funcionamiento del embalse y sus interacciones con el entorno.

La elección del software ARENA como herramienta de simulación se justifica por su capacidad para manejar sistemas complejos y dinámicos, así como por su amplia aceptación en la comunidad científica y técnica. Se explicará cómo se configuró y parametrizó el modelo en ARENA, incluyendo la incorporación de datos históricos y la definición de variables estocásticas.

El modelo de simulación en ARENA servirá como plataforma para llevar a cabo estudios de caso que permitan analizar el comportamiento del embalse en diferentes escenarios y condiciones. Se examinarán aspectos como la variabilidad de las precipitaciones, la demanda de agua para riego y otros usos, así como los efectos de las fluctuaciones en el volumen del embalse en la producción de energía eléctrica.

3.1 Sistema de simulación discreta

Los sistemas de simulación deben caracterizar la situación real del estudio, siendo clasificados en sistemas continuos y discretos. Los sistemas continuos interactúan con variables que presentan cambios continuos en relación al tiempo, en cambio, los sistemas discretos cambian en instantes.

Según la complejidad del sistema, se recurre a la simulación para experimentar con las variables. En el caso de sistemas discretos, se trabaja con variables aleatorias de función distribuida que apoyados de ordenadores que procesen una cantidad considerable de cálculos, facilitan el estudio y análisis de sistemas complejos, siendo del software Arena para simulación de modelos lógicos de sistemas.

3.2 Etapas de la simulación

Para una correcta y adecuada simulación, se presenta una lista ordenada de etapas que el diseñador de sistemas debe tomar en cuenta:

1. Marco lógico: Se deben especificar los objetivos, actividades, acciones, las hipótesis a contrastar y el alcance del estudio. Es importante, además, de establecer los criterios de verificación de los resultados, evaluación de los recursos con sus respectivas atribuciones.
2. Modelo conceptual: Es un modelo basado en el marco lógico que toma la forma del sistema objeto de estudio.
3. Validación del modelo: Es la comprobación coherente y consistente del modelo con el sistema debidamente representado.
4. Construcción del modelo computacional: Comprende la selección del programa de simulación y la utilización de las herramientas para el diseño, condiciones de contorno, repeticiones, resultados. En el presente trabajo se ha elegido el software Arena para simulación discreta.
5. Validación del modelo computacional: Comprende realizar experimentos para analizar los resultados que son de tipo estadísticos.

La ventaja de optar por una simulación de eventos discretos es la practicidad de resolver problemas complejos y de experimentar con las variables según condiciones

experimentales, además de estudiar los resultados en un horizonte de tiempo. Sin embargo, la desventaja es el alto consumo de procesamiento de datos que se genera, involucrando recursos técnicos y humanos que, en virtud de generar resultados satisfactorios, deben evaluarse el costo asociado, ejemplo, utilizar un ordenador con un procesador de alta gama para minimizar los tiempos de los resultados.

3.3 ARENA

Arena es un software comercial desarrollado por la empresa Rockwell para optimizar las operaciones de un dado sistema, sirve como una herramienta computacional de apoyo a la toma de decisiones. La simulación se basa en el modelado de eventos discretos que son representados como diagramas de flujo y cuenta con una biblioteca de módulos (o bloques) y paquetes para elaborar el modelo lógico y analizar las variables experimentales a través de escenarios predeterminados.

3.4 Esquema de simulación

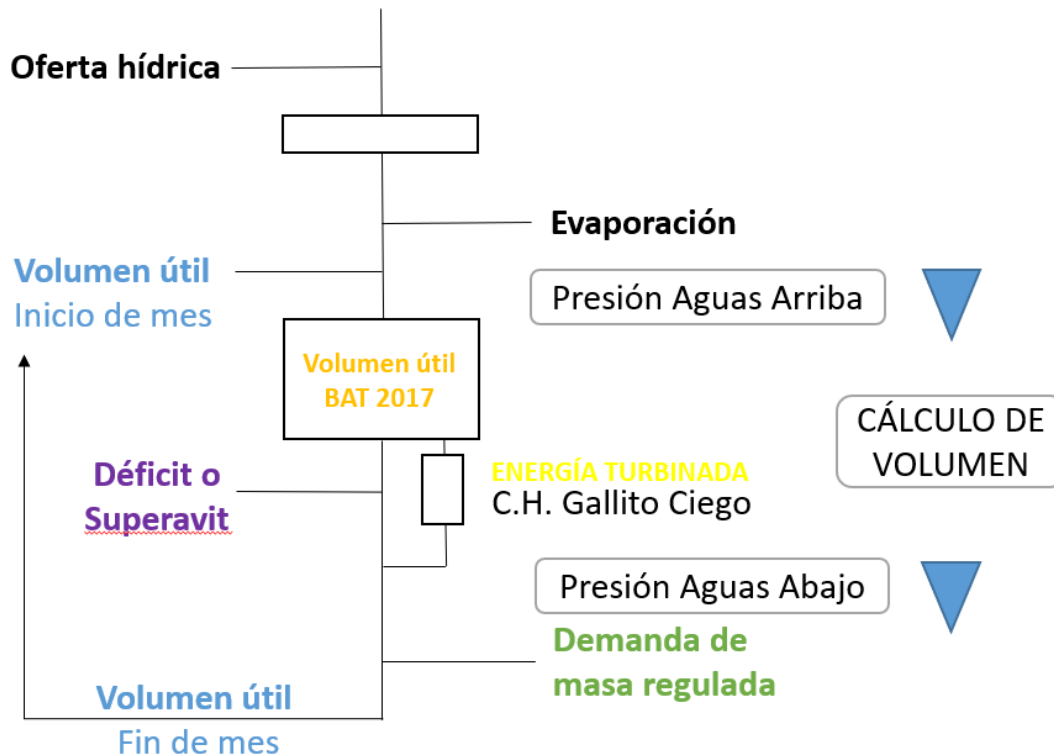
El esquema de simulación parte desde el registro por una estación hidrométrica de las precipitaciones que suministran del recurso hídrico los reservorios para mantenerse almacenado y sea turbinado por la C.H. Gallito Ciego y alimentado directamente para el área de Riego del Valle Jequetepeque, producto del Caudal Regulado.

Con este esquema en la Figura 15 se describen los parámetros utilizados en la simulación estocástica, como es:

- La demanda bruta superficial del reservorio Gallito Ciego en Hectómetro Cúbicos (Hm^3), considerada como la masa o caudal regulado.
- Pérdidas del sistema mayor por evaporación en Hectómetro Cúbicos (Hm^3).
- Déficit en Hectómetro Cúbicos (Hm^3), considerada como la dificultad de atender la demanda.

- Superávit en Hectómetro Cúbicos (Hm^3), considerada como la disponibilidad de oferta hídrica para el siguiente mes.
- Oferta hídrica al 75% en Hectómetro Cúbicos (Hm^3), es la masa hídrica que ingresa al embalse para estar disponible para turbinado.
- Volumen útil del reservorio a inicio de mes en Hectómetro Cúbicos (Hm^3).
- Volumen útil del reservorio a fin de mes en Hectómetro Cúbicos (Hm^3).
- Volumen útil máximo del reservorio en Hectómetro Cúbicos (Hm^3).
- Caudal turbinable en Hectómetro Cúbicos Hm^3/h .
- Tiempo turbinable en Horas (h).
- Potencia efectiva turbinable en Megawatts (MW).
- Energía en Gigawatts en GWh.

Figura 15 Esquema de simulación

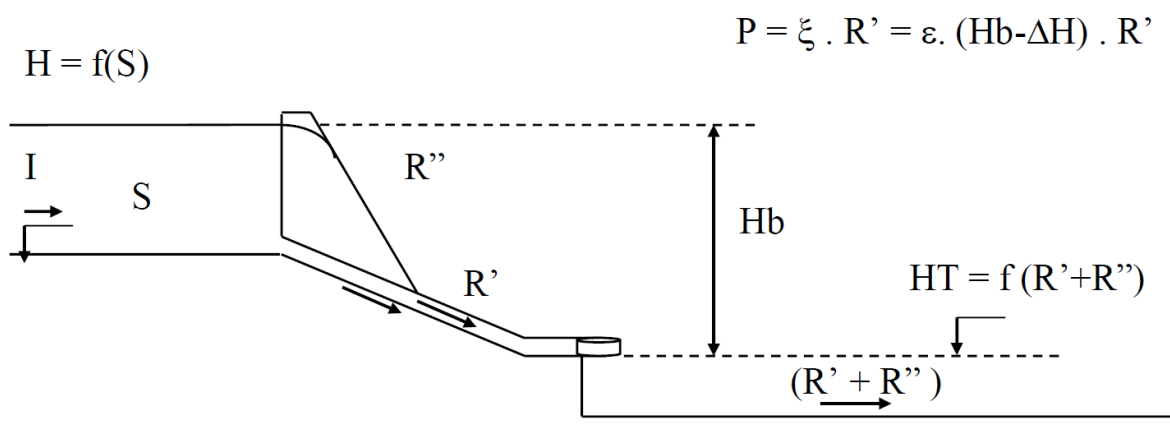


3.5 Modelo lógico

Para desarrollar el modelo lógico en el software ARENA, es esencial comprender en detalle el sistema de aprovechamiento hidroeléctrico, centrándose en el embalse y la central hidroeléctrica Gallito Ciego. En este sentido, este estudio se basa en la formulación original del modelo HIDRO propuesto por Falcetta (2020), adaptándolo específicamente al contexto del embalse y la central hidroeléctrica mencionada. El funcionamiento básico de este sistema se caracteriza por la diferencia de alturas entre el nivel del agua en el embalse y el canal de escape aguas abajo, lo que impulsa la generación de energía eléctrica.

Se presenta un modelo genérico, cuyo esquema fue previamente propuesto por Falcetta (2020) y se muestra en la Figura 16. Este esquema proporciona una representación visual del funcionamiento general de una central hidroeléctrica, sirviendo como punto de referencia para la notación y parametrización del modelo específico de la central hidroeléctrica Gallito Ciego.

Figura 16 Esquema de una central hidroeléctrica



Fuente: Falcetta (2020). Adaptada de Zambon (2008)

La Figura 16 muestra los elementos principales de una central hidroeléctrica, incluyendo el embalse, la presa, el canal de salida y la turbina. Estos componentes interactúan entre sí para regular el flujo de agua y convertir la energía hidráulica en energía

eléctrica. En el caso específico de Gallito Ciego, se adaptará este modelo genérico para reflejar las características únicas del embalse y su operación, considerando factores como la topografía del terreno, la capacidad de almacenamiento y los caudales de entrada y salida.

Al construir el modelo lógico en el software ARENA, se asignarán parámetros específicos a cada componente del sistema, como la capacidad de almacenamiento del embalse, la eficiencia de la turbina y las tasas de flujo de entrada y salida. Además, se incorporarán datos históricos y proyectados sobre los caudales y las precipitaciones para realizar simulaciones realistas y predictivas del comportamiento del embalse y la generación de energía.

Los parámetros del modelo son:

- Mes (i)
- Año (t)
- Número de Años (n)
- Demanda bruta superficial del reservorio (D) en Hm^3 .
- Pérdidas del sistema mayor por evaporación (P) en Hm^3 .
- Déficit (Def) en Hm^3 .
- Superávit (Sup) en Hm^3 .
- Oferta hídrica al 75% (O) en Hm^3 .
- Volumen útil del reservorio a inicio de mes (VI) en Hm^3 .
- Volumen útil del reservorio a fin de mes (VF) en Hm^3 .
- Volumen útil máximo del reservorio (V_{max}) en Hm^3 .
- Caudal turbinable (CT) en Hm^3/h .
- Tiempo turbinable (TT) en h.
- Potencia efectiva turbinable (P_{ET}) en $\text{MW} = 10^6 \text{ W}$.

- Energía (E) en GWh.

El modelo lógico estocástico e iterativo en el tiempo (años) se sujeta respecto al volumen del reservorio, por tanto, el modelo inicia con:

$$VF_{i,t} = VI_{i,t} + Def_{i,t} + Sup_{i,t}$$

El modelo lógico está sujeto a las siguientes restricciones:

Primera restricción, el volumen útil no debe superar el volumen útil máximo del reservorio establecido por la última batimetría realizada en el 2017, con un valor de 366.09 Hm³, por tanto, la ecuación es:

$$If VF_{i,t} \leq Vmax Then VF_{i,t} = VI_{i,t} + Def_{i,t} + Sup_{i,t}$$

$$If VF_{i,t} > Vmax Then VF_{i,t} = Vmax$$

Segunda restricción, el déficit está en función de la oferta hídrica al 75%, la demanda bruta superficial y las pérdidas en el sistema mayor por evaporación, por tanto, la ecuación es:

$$Def_{i,t} = O_{i,t} - D_{i,t} - P_{i,t}$$

$$If Def_{i,t} < 0 Then Def_{i,t} = O_{i,t} - D_{i,t} - P_{i,t}$$

$$If Def_{i,t} \geq 0 Then Def_{i,t} = 0$$

Tercera restricción, el superávit está en función de la oferta hídrica al 75%, la demanda bruta superficial y las pérdidas en el sistema mayor por evaporación, por tanto, la ecuación es:

$$Sup_{i,t} = O_{i,t} - D_{i,t} - P_{i,t}$$

$$If Sup_{i,t} > 0 Then Sup_{i,t} = O_{i,t} - D_{i,t} - P_{i,t}$$

$$If Sup_{i,t} \leq 0 Then Sup_{i,t} = 0$$

La segunda y tercera restricción aseguran que una anule a la otra y atribuya en el cálculo si hay un déficit o superávit en la función del volumen útil del reservorio al fin de mes.

Cuarta restricción, el volumen útil del reservorio a inicio de mes es igual al volumen útil del reservorio del fin de mes anterior, por tanto, la ecuación es:

$$VI_{i+1,t} = VF_{i,t}$$

Quinta restricción, balance de descarga dada por la oferta hídrica respecto a la demanda bruta superficial, por tanto, la ecuación es:

$$\sum_{t=1}^n o_{i,t} < \sum_{t=1}^n D_{i,t}$$

Sexta restricción, tiempo turbinable en función del volumen turbinado (igual a la demanda bruta superficial) y el caudal turbinable cuyo valor es de 0.148 Hm³/h, por tanto, la ecuación es:

$$TT_{i,t} = \frac{D_{i,t}}{CT}$$

Sétima restricción, Energía por cada mes en función de la potencia efectiva turbinable cuyo valor es 35.28 MW por el tiempo turbinable, suministrado por el SEIN 2023, pero no incluye la eficiencia de la turbina y tuberías de presión.

$$E_{i,t} = P_{ET} \cdot TT_{i,t} \cdot 10^{-3}$$

Los parámetros presentados para el modelo de simulación en Arena están en función estocástica o constante por ser algunos valores predeterminados. Como resultados se tendrán tres escenarios en los doce meses del año ($i=1, \dots, 12$) y para n años. El primero es el balance proyecto de un caso real, el segundo es el balance real y el tercero es el balance del modelo lógico por simulación en Arena.

Los datos de entrada y salida de la simulación del modelo lógico serán presentados en la Tabla 3, siendo que los datos de entrada de los parámetros del modelo tendrán una función estadística triángulo asumida en relación del valor proyectado y real.

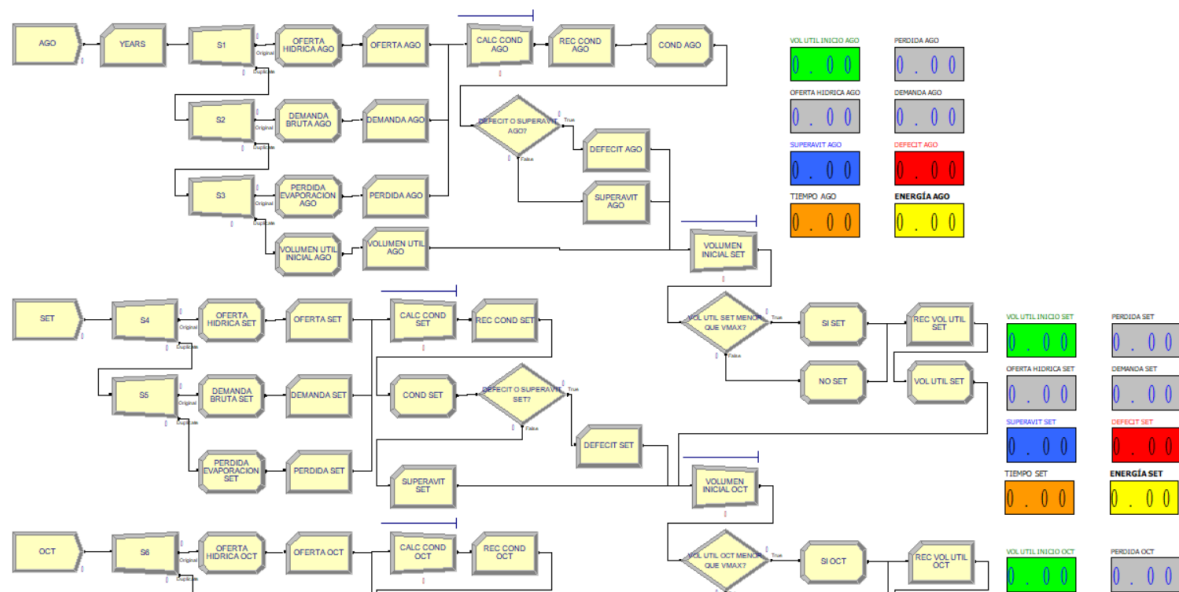
Tabla 3 Relación de datos de entrada y salida del estudio.

ÍTEM	AÑO HIDROLOGICO AGOSTO AÑO 1 - JULIO AÑO 2											
	AÑO 1					AÑO 2						
	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
O _{proyectado}												
O _{real}												
O _{modelo}												
D _{proyectado}												
D _{real}												
D _{modelo}												
P _{proyectado}												
P _{real}												
P _{modelo}												
Def _{proyectado}												
Def _{real}												
Def _{modelo}												
Sup _{proyectado}												
Sup _{real}												
Sup _{modelo}												
VI _{proyectado}												
VI _{real}												
VI _{modelo}												
V _{max}	366.09											
VF _{proyectado}												
VF _{real}												
VF _{modelo}												
E _{proyectado}												
E _{real}												
E _{modelo}												

3.6 Modelo de simulación en Arena

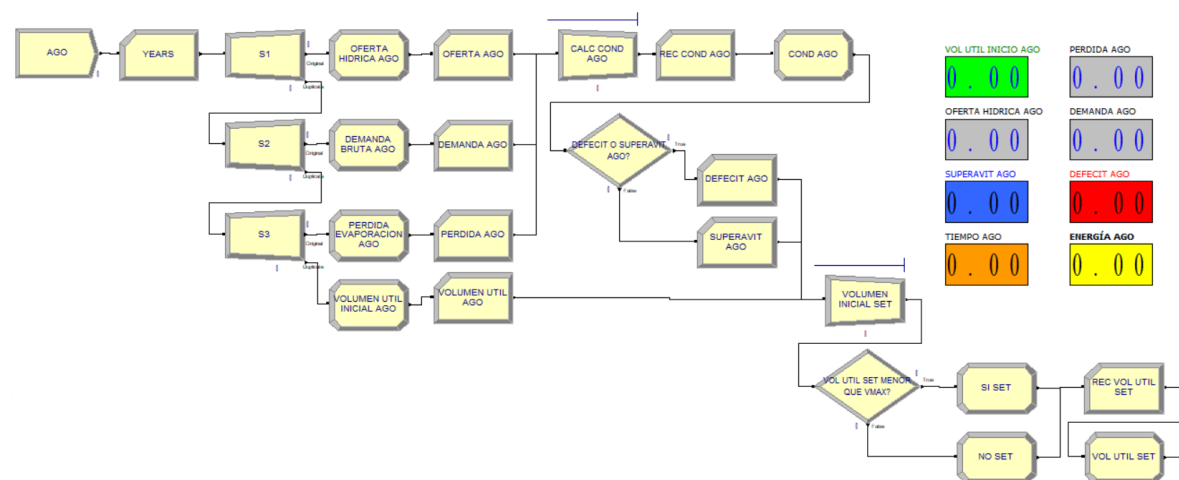
En esta sección se introduce el modelo de simulación en Arena, el cual sigue el modelo lógico detallado en la sección 3.5. El modelo de simulación se ha diseñado para representar cada mes del año, lo que proporciona una visión detallada y precisa de la dinámica del sistema a lo largo del tiempo. Un ejemplo de esta estructura se muestra en la Figura 17.

Figura 17 Ejemplo de marco lógico del modelo de simulación en Arena



El marco lógico para el mes de agosto del año 1 se presenta en la Figura 18.

Figura 18 Marco Lógico del mes de agosto de año 1



Este marco lógico sigue un orden específico, como se detalla a continuación:

En primer lugar, En la Figura 19 se muestra el proceso de creación de entidades y los cuadros de resultados típicos de cada mes en el modelo de simulación en Arena. Este proceso es fundamental para establecer las condiciones iniciales y monitorear la evolución de las variables a lo largo del tiempo. En el lado izquierdo de la Figura 19, se observa el proceso de creación de entidades, donde se generan instancias para cada mes del año. Estas

entidades representan el flujo temporal del sistema y permiten rastrear la evolución de las variables a lo largo de la simulación. Se establece un valor constante de 12 para el número de meses, lo que indica la duración total de la simulación. Además, se define un número de llegada de 10, que representa el número de años que se pretende iterar en el modelo. En el lado derecho de la Figura 19, se muestran los cuadros de resultados típicos de cada mes. Estos cuadros contienen información detallada sobre las variables clave del sistema, como la oferta hídrica, la demanda bruta, las pérdidas por evaporación y el volumen útil del embalse. Los resultados se presentan en forma de tablas de datos que muestran la evolución de estas variables a lo largo del tiempo y permiten un análisis detallado de su comportamiento.

Figura 19 Creación y cuadros de resultados típico de mes

The image shows a 'Create' dialog box for a simulation entity. The 'Name' field is set to 'AGO' and the 'Entity Type' is 'Mes'. Under 'Time Between Arrivals', the 'Type' is 'Constant', the 'Value' is '12', and the 'Units' are 'Days'. Under 'Entities per Arrival', the 'Max Arrivals' is '10' and 'First Creation' is '0'. To the right of the dialog, there are eight small tables, each representing a different variable's typical monthly results. Each table has a title and a single row of data showing '0.00'.

Variable	Value
VOL UTIL INICIO AGO	0.00
PERDIDA AGO	0.00
OFERTA HIDRICA AGO	0.00
DEMANDA AGO	0.00
SUPERAVIT AGO	0.00
DEFECIT AGO	0.00
TIEMPO AGO	0.00
ENERGÍA AGO	0.00

Posteriormente, se registra la información anual, lo que facilita la recopilación de datos para cada año simulado y permite un análisis detallado de los resultados obtenidos. Esta información es fundamental para evaluar el rendimiento del embalse en términos de oferta hídrica, demanda bruta, pérdida por evaporación y volumen útil.

Luego, se definen las variables estocásticas que influyen en el comportamiento del embalse, como la oferta hídrica disponible, la demanda de agua, y las pérdidas por evaporación. Estas variables se modelan de acuerdo con distribuciones probabilísticas basadas en datos históricos y estimaciones para capturar la variabilidad inherente del sistema.

Una vez definidas las variables, se evalúa la condición de superávit o déficit hídrico, utilizando las fórmulas y criterios establecidos en la sección 3.5. Esta evaluación determina la cantidad de agua disponible al final del mes y guía las decisiones sobre el manejo del embalse.

Con base en los resultados de la evaluación, se actualiza el volumen útil del embalse al final del mes, lo que implica ajustar el nivel de agua almacenada para garantizar un equilibrio adecuado entre la oferta y la demanda. Se establecen restricciones para evitar que el volumen exceda la capacidad máxima del embalse, lo que podría tener consecuencias negativas para la operación y seguridad del sistema.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en forma de cuadros y gráficos, que muestran el estado del embalse y las variables asociadas en cada punto de tiempo. Estos resultados son fundamentales para evaluar el desempeño del embalse en diferentes escenarios y respaldar la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico.

En resumen, la implementación del modelo de simulación en Arena proporciona una herramienta poderosa para comprender y analizar el comportamiento del embalse Gallito Ciego en condiciones dinámicas y estocásticas. Este enfoque permite explorar diferentes escenarios y evaluar el impacto de las decisiones de gestión en la disponibilidad de agua y la producción de energía eléctrica.

Se presentan los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre del año 1, así como de enero a julio del año 2, respectivamente, desde la Figura 20 hasta la Figura 30.

Figura 20 Marco Lógico del mes de setiembre de año 1

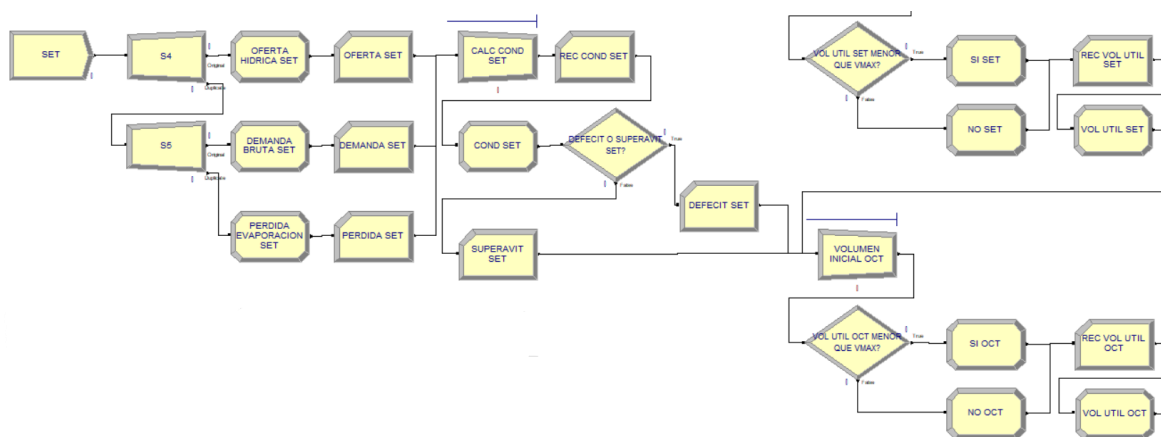


Figura 21 Marco Lógico del mes de octubre de año 1

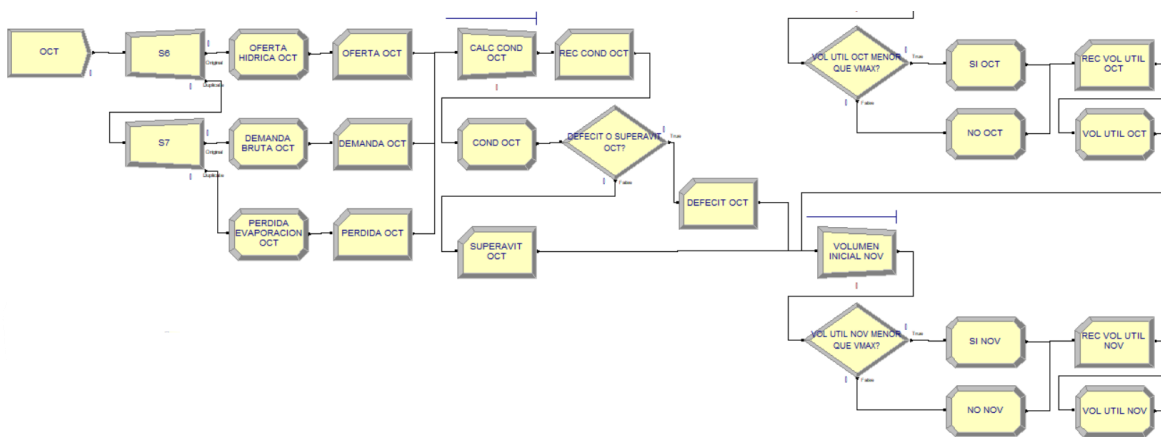


Figura 22 Marco Lógico del mes de noviembre de año 1

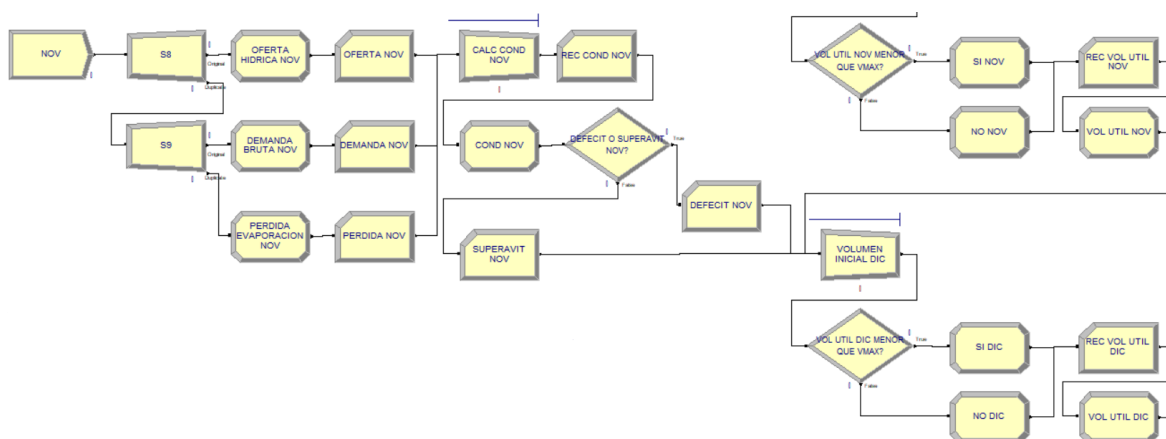


Figura 23 Marco Lógico del mes de diciembre de año 1

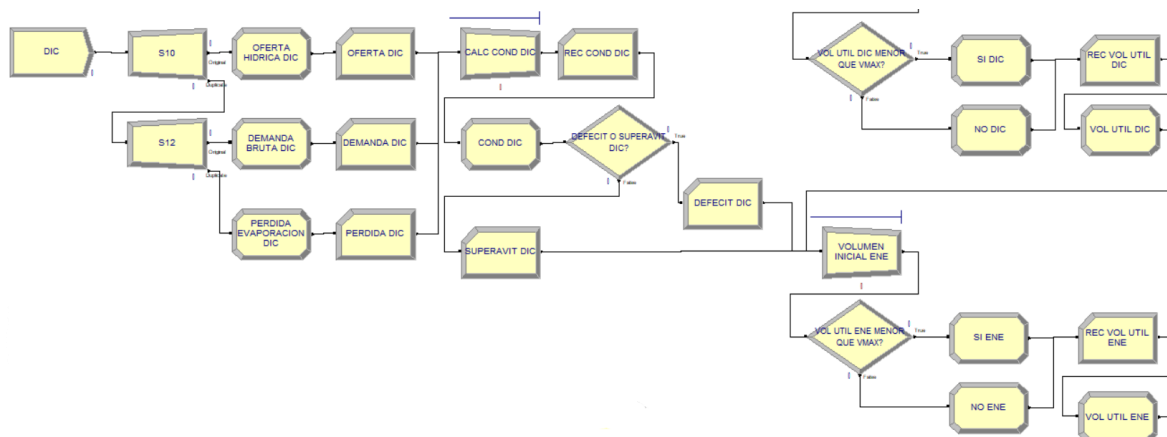


Figura 24 Marco Lógico del mes de enero de año 2

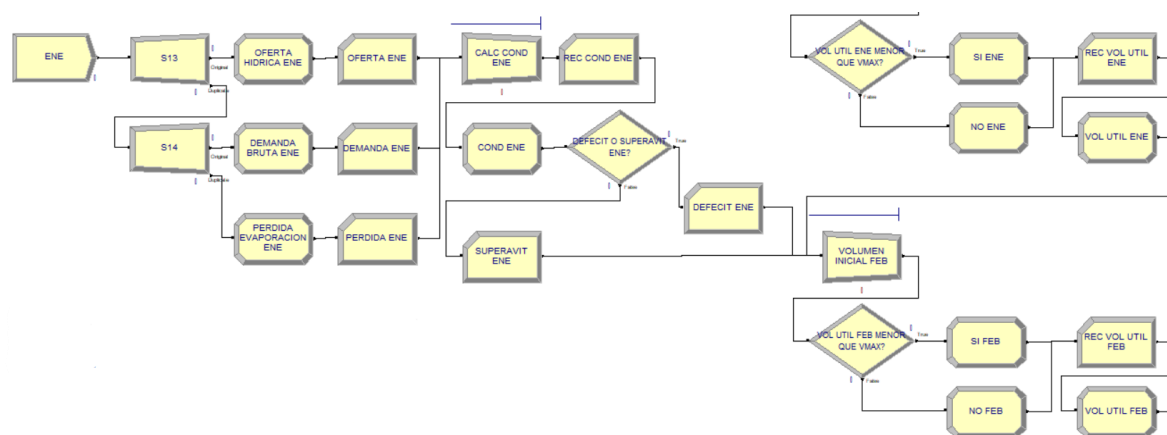


Figura 25 Marco Lógico del mes de febrero de año 2

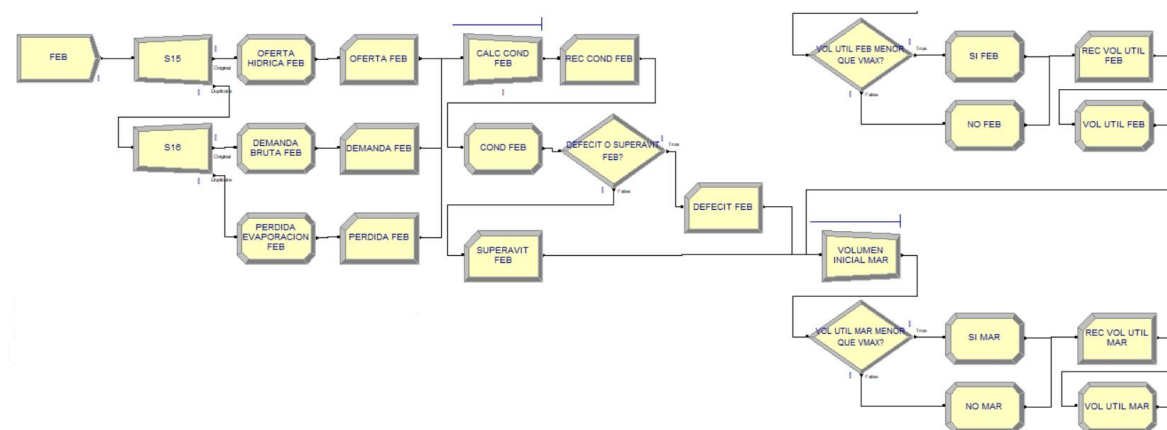


Figura 26 Marco Lógico del mes de marzo de año 2

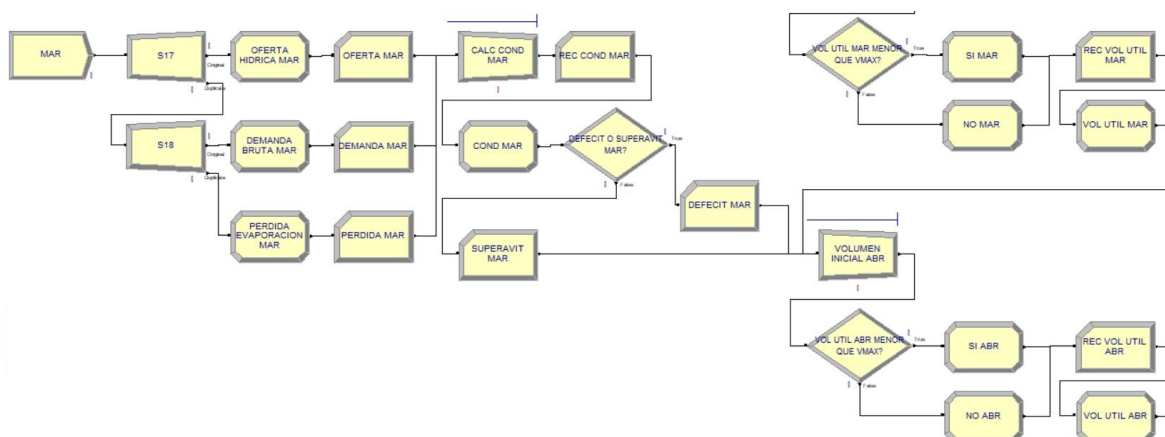


Figura 27 Marco Lógico del mes de abril de año 2

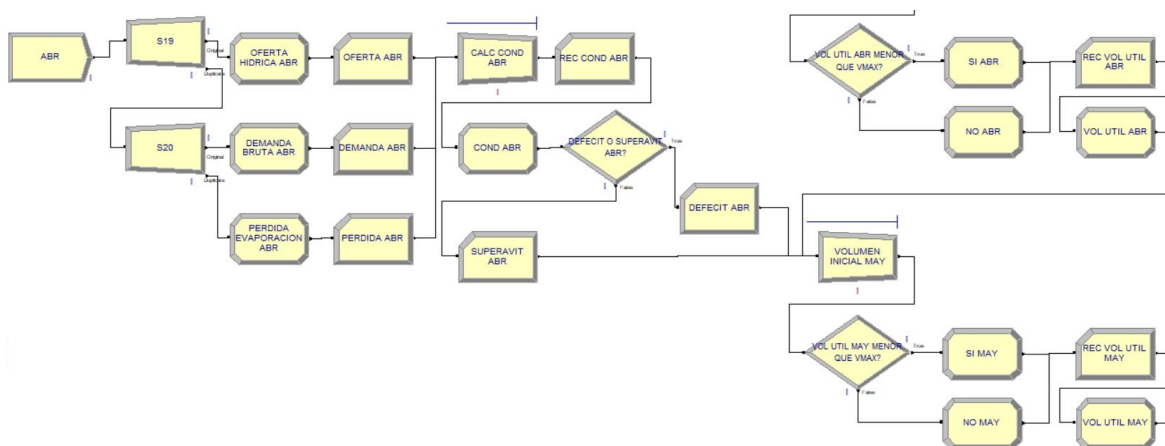


Figura 28 Marco Lógico del mes de mayo de año 2

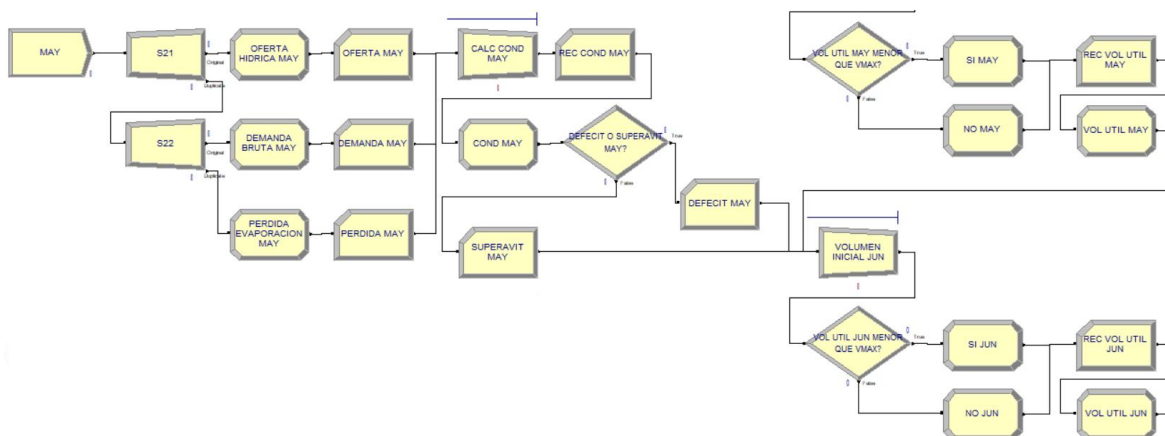


Figura 29 Marco Lógico del mes de junio de año 2

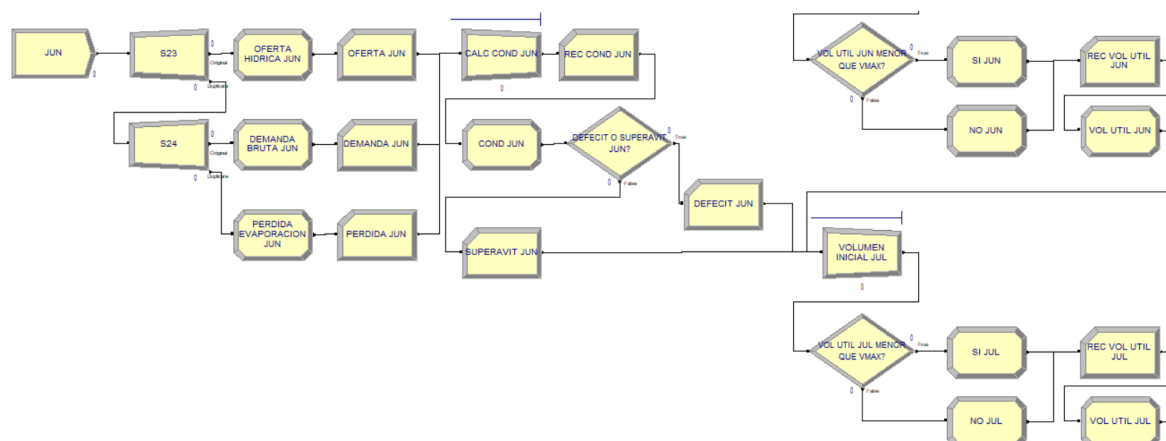
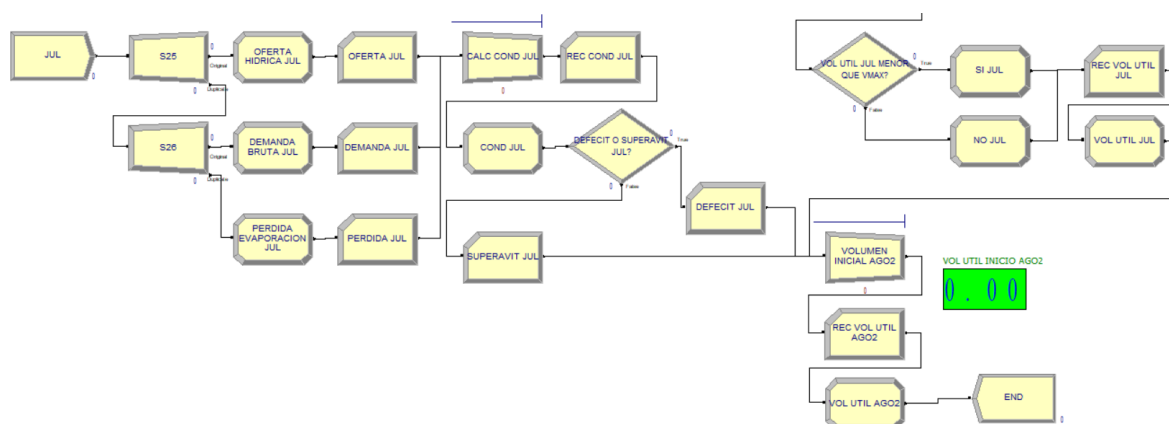


Figura 30 Marco Lógico del mes de julio de año 2



En la Figura 30 se muestra el volumen útil al inicio de agosto del año 2, marcando así el cierre del ciclo de análisis. Sin embargo, para mejorar la representación del modelo y su aplicabilidad a futuro, sería beneficioso que este dato también contribuyera a los años siguientes, como el año 3, 4 y así sucesivamente.

Una limitación del estudio es que no se imputará este valor en los parámetros iterativos. En su lugar, se asumirá que el mes de agosto sigue una función estadística con una desviación estándar, lo que garantiza la posibilidad de que ocurran variaciones en el volumen útil en los meses siguientes, asegurando así una mayor robustez en el análisis y una mejor representación de las posibles condiciones del embalse en el futuro.

Capítulo IV. Resultados

4.1 Datos de entrada

La Tabla 4 proporciona un análisis detallado del plan de descargas del embalse Gallito Ciego durante el periodo de agosto de 2022 a julio de 2023. Este seguimiento permite verificar varios parámetros críticos que influyen en la gestión del embalse y en la provisión de un caudal regulado al valle Jequetepeque. A continuación, se profundiza en cada uno de los parámetros presentados en la tabla:

1. **Oferta hídrica al 75%:** Este parámetro representa la cantidad de agua disponible en el embalse para ser utilizada en el proceso de generación de energía eléctrica. La oferta hídrica al 75% se refiere a la reserva estratégica de agua que se mantiene para garantizar la disponibilidad durante los periodos de alta demanda.
2. **Demanda de superficie bruta:** Se refiere a la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de riego y otros usos superficiales en el Valle Jequetepeque. Esta demanda puede variar según las estaciones del año y las condiciones climáticas. También es la relacionada a la masa y caudal regulados.
3. **Pérdidas por evaporación:** Representa la cantidad de agua perdida debido a la evaporación natural del embalse. Este factor es importante ya que afecta directamente la disponibilidad de agua para otros usos y puede influir en la gestión de los recursos hídricos.
4. **Condición de Déficit o Superávit:** Este parámetro indica si existe un exceso de agua disponible (superávit) o si hay una insuficiencia de agua (déficit) para satisfacer la demanda. Esta condición es fundamental para determinar las acciones necesarias de gestión del embalse.

5. **Volúmenes útiles al inicio y final del mes:** Representan los niveles de agua almacenados en el embalse al comienzo y al final de cada mes. Estos volúmenes garantizan un suministro constante de agua durante todo el año y para evitar situaciones de escasez o inundaciones.

Además de estos parámetros, la Tabla 4 también incluye el concepto de la función triangular, la cual es una herramienta importante en el modelado de incertidumbres en la simulación estocástica. La función triangular es un método de distribución de probabilidad que se utiliza para representar la variabilidad de una variable aleatoria en un rango dado.

La función triangular se caracteriza por tener tres parámetros principales: el valor mínimo (a), el valor máximo (b) y el valor más probable (m). El valor más probable (m) es el punto central de la distribución y representa el valor más probable de la variable aleatoria. En el contexto del embalse Gallito Ciego, el parámetro m de la función triangular representa, por ejemplo, el volumen de agua más probable en el embalse en un momento dado. Por ejemplo, la función triangular del parámetro $O_{\text{modelo}} = \text{TRIA} (O_{\text{proyectado}}, m, O_{\text{real}})$ siempre que el valor $O_{\text{proyectado}}$ sea menor que el O_{real} de lo contrario se invertirá el orden porque el a es menor que b en la función triangular. En valores cuantitativos, el valor de $O_{\text{modelo}} = \text{TRIA} (4.08, 7, 8.61)$ para el mes de agosto del año 1, ver Tabla 4.

El parámetro m de la función triangular influye en la forma de la distribución de probabilidad. Si el valor de m está más cerca del valor mínimo (a), la distribución será sesgada hacia la izquierda, mientras que si está más cerca del valor máximo (b), la distribución estará sesgada hacia la derecha. Esto permite modelar una amplia gama de escenarios posibles y capturar la variabilidad inherente en el sistema del embalse.

En resumen, la Tabla 4 proporciona una visión detallada de los parámetros clave que afectan el funcionamiento del embalse Gallito Ciego y su capacidad para proporcionar un caudal regulado al valle Jequetepeque. Además, introduce el concepto de la función

triangular, que es una herramienta fundamental en el modelado de incertidumbres en la simulación estocástica y que desempeña un papel importante en la representación de la variabilidad de las variables aleatorias en el sistema.

Tabla 4 Datos de entrada de año hídrico.

ÍTEM	AÑO HIDROLOGICO AGOSTO AÑO 1 - JULIO AÑO 2 (en Hm ³)											
	AÑO 1					AÑO 2						
	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAYO	JUN	JUL
O _{proyectado}	4.08	3.60	7.20	14.65	16.45	26.00	66.22	120.30	88.15	48.50	18.01	8.62
O _{real}	8.61	6.24	8.68	4.11	6.47	68.85	126.31	362.40	297.26	101.72	37.91	13.96
O _{modelo m}	7	6	8	10	10	60	100	250	210	70	20	11
D _{proyectado}	29.02	25.96	27.55	50.04	97.96	120.33	103.70	90.04	42.48	14.09	13.63	13.95
D _{real}	31.78	28.44	44.35	66.44	101.36	88.89	92.39	76.44	55.04	33.14	31.79	32.88
D _{modelo m}	30	27	40	55	100	110	100	80	50	28	25	28
P _{proyectado}	1.53	1.57	1.74	1.49	1.44	1.19	1.15	1.43	1.75	1.81	1.60	1.68
P _{real}	1.61	1.50	1.47	1.49	1.12	0.98	0.76	1.50	1.75	1.81	1.60	1.68
P _{modelo m}	1.58	1.55	1.70	1.49	1.36	1.12	0.90	1.48	1.75	1.81	1.60	1.68
Def _{proyectado}	-26.47	-23.93	-22.09	-36.88	-82.95	-95.52	-38.63	0.00	0.00	0.00	0.00	-7.01
Def _{real}	-24.78	-23.7	-37.14	-63.82	-96.01	-21.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-20.6
Sup _{proyectado}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.83	43.92	32.6	2.78	0.00
Sup _{real}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.16	284.46	240.47	66.77	4.52	0.00
VI _{proyectado}	344.26	317.79	293.87	271.78	234.90	151.96	56.44	17.81	46.64	90.57	123.16	125.94
VI _{real}	341.70	315.27	290.57	250.73	187.58	90.92	64.16	98.28	364.45	366.08	366.08	366.08
VI _{modelo m}	343											
V _{max}	366.09											
VF _{proyectado}	317.79	293.87	271.78	234.90	151.96	56.44	17.81	46.64	90.57	123.16	125.94	118.94
VF _{real}	315.27	290.57	250.73	187.58	90.92	64.16	98.28	364.45	366.08	366.08	366.08	345.49
E _{proyectado}	6.92	6.19	6.57	11.93	23.35	28.68	24.72	21.46	10.13	3.36	3.25	3.33
E _{real}	7.58	6.78	10.57	15.84	24.16	21.19	22.02	18.22	13.12	7.90	7.58	7.84

4.2 Resultados de caso real

En este estudio de caso, se presenta una simulación del embalse Gallito Ciego, que forma parte de un proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico en la región. Se analizan los parámetros clave que influyen en la gestión del embalse y en la provisión de un caudal regulado al valle Jequetepeque. Se simulan periodos de 5, 10 y 15 años para evaluar el comportamiento del embalse bajo diferentes condiciones para cada mes del año hidrológico del mes de agosto del año 1 al mes de julio del año 2 en la Tabla 5.

La simulación del embalse Gallito Ciego proporciona información valiosa sobre su comportamiento bajo diferentes condiciones y períodos de tiempo. Los resultados

obtenidos permiten evaluar la capacidad del embalse para satisfacer la demanda de agua y generar energía eléctrica de manera sostenible. Este análisis contribuye a una mejor comprensión de la gestión de los recursos hídricos y al desarrollo de estrategias para su uso eficiente y responsable.

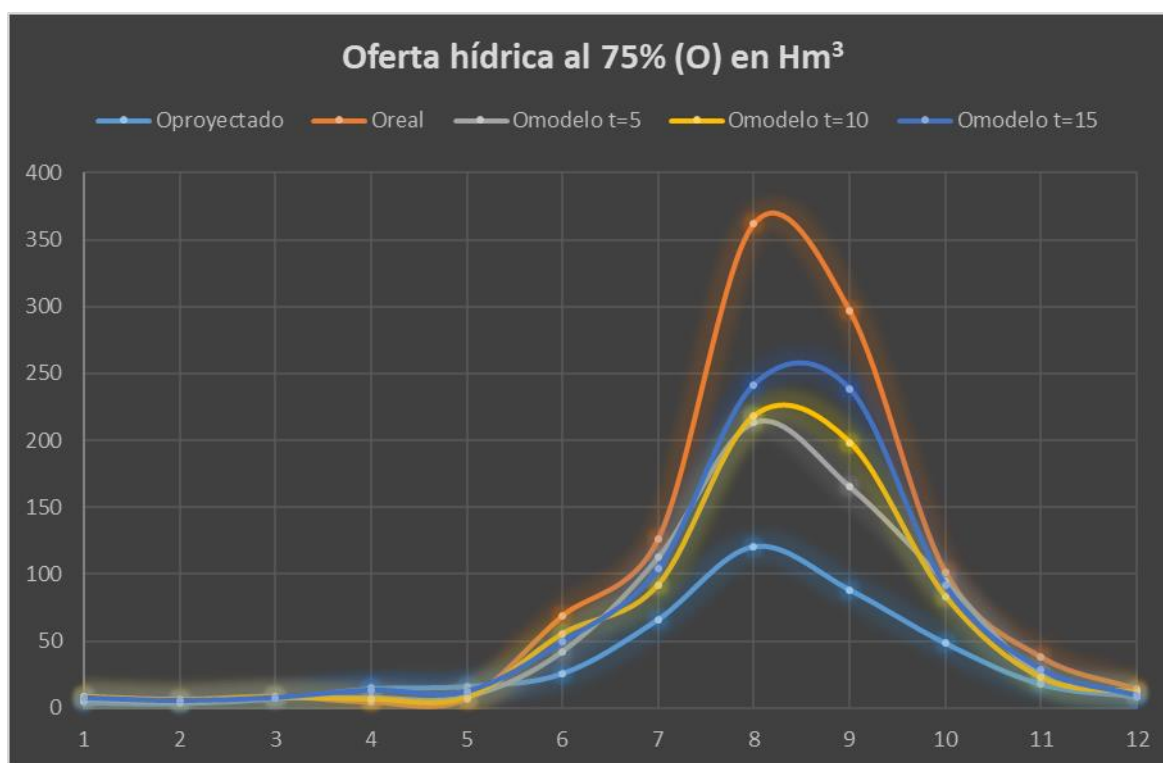
Tabla 5 Datos de salida de año hídrico para el modelo de simulación de 5, 10 y 15 años.

ÍTEM	AÑO HIDROLOGICO AGOSTO AÑO 1 - JULIO AÑO 2												TOTAL Hm³
	AÑO 1					AÑO 2							
	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	
O _{proyectado}	4.08	3.60	7.20	14.65	16.45	26.00	66.22	120.30	88.15	48.50	18.01	8.62	421.78
O _{real}	8.61	6.24	8.68	4.11	6.47	68.85	126.31	362.40	297.26	101.72	37.91	13.96	1042.52
O _{modelo t=5}	6.56	4.42	7.69	7.60	8.37	42.27	112.53	213.20	165.31	94.41	24.32	11.23	697.91
O _{modelo t=10}	8.09	5.55	7.93	6.39	7.60	55.30	92.02	218.28	198.48	83.25	22.44	11.52	716.85
O _{modelo t=15}	7.41	5.23	7.63	13.11	12.26	49.27	104.09	241.63	238.46	91.49	28.95	9.24	808.77
D _{proyectado}	29.02	25.96	27.55	50.04	97.96	120.33	103.70	90.04	42.48	14.09	13.63	13.95	628.75
D _{real}	31.78	28.44	44.35	66.44	101.36	88.89	92.39	76.44	55.04	33.14	31.79	32.88	682.94
D _{modelo t=5}	30.42	27.23	33.80	55.48	100.74	102.90	99.82	84.95	51.64	28.04	22.73	23.90	562.21
D _{modelo t=10}	30.55	26.77	31.66	57.25	99.26	110.81	99.44	81.37	50.06	17.63	20.29	25.22	650.31
D _{modelo t=15}	30.29	27.29	40.37	60.49	99.87	104.16	99.46	86.17	49.03	27.85	22.58	23.63	671.19
P _{proyectado}	1.53	1.57	1.74	1.49	1.44	1.19	1.15	1.43	1.75	1.81	1.60	1.68	18.38
P _{real}	1.61	1.50	1.47	1.49	1.12	0.98	0.76	1.50	1.75	1.81	1.60	1.68	17.27
P _{modelo t=5}	1.59	1.55	1.63	1.49	1.30	1.02	0.93	1.44	1.75	1.81	1.60	1.68	17.79
P _{modelo t=10}	1.57	1.55	1.70	1.49	1.27	1.14	0.94	1.44	1.75	1.81	1.60	1.68	17.94
P _{modelo t=15}	1.58	1.53	1.63	1.49	1.24	1.07	0.78	1.47	1.75	1.81	1.60	1.68	17.63
Def _{proyectado}	-26.47	-23.93	-22.09	-36.88	-82.95	-95.52	-38.63	0.00	0.00	0.00	0.00	-7.01	-333.48
Def _{real}	-24.78	-23.7	-37.14	-63.82	-96.01	-21.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-20.6	-287.07
Def _{modelo t=5}	-8.48	-8.12	-9.25	-16.46	-31.22	-20.55	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.78	-97.29
Def _{modelo t=10}	-16.02	-15.18	-16.95	-34.90	-61.95	-37.77	-1.67	0.00	0.00	0.00	0.15	-10.24	-194.53
Def _{modelo t=15}	-24.46	-23.60	-34.37	-48.87	-88.85	-55.96	1.03	0.00	0.00	0.00	1.91	-16.07	-289.24
Sup _{proyectado}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.83	43.92	32.6	2.78	0.00	108.13
Sup _{real}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.16	284.46	240.47	66.77	4.52	0.00	629.38
Sup _{modelo t=5}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.36	42.27	37.30	21.52	0.00	0.00	103.45
Sup _{modelo t=10}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.90	90.31	97.78	42.54	0.22	0.00	226.95
Sup _{modelo t=15}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.82	153.99	187.68	61.83	2.86	0.00	409.18
VI _{proyectado}	344.26	317.79	293.87	271.78	234.90	151.96	56.44	17.81	46.64	90.57	123.16	125.94	2075.12
VI _{real}	341.70	315.27	290.57	250.73	187.58	90.92	64.16	98.28	364.45	366.08	366.08	366.08	3101.9
VI _{modelo t=5}	342.33	316.88	292.52	264.78	215.41	121.74	60.09	71.86	198.67	310.58	366.09	366.09	2927.04
VI _{modelo t=10}	343.72	319.68	296.91	271.48	219.12	126.20	69.55	61.19	196.66	343.33	366.09	366.09	2980.02
VI _{modelo t=15}	342.01	317.55	293.96	259.59	210.72	121.87	65.90	69.75	223.74	366.09	366.09	366.09	3048.69
V _{max}	366.09												
VF _{proyectado}	317.79	293.87	271.78	234.90	151.96	56.44	17.81	46.64	90.57	123.16	125.94	118.94	1849.8
VF _{real}	315.27	290.57	250.73	187.58	90.92	64.16	98.28	364.45	366.08	366.08	366.08	345.49	3105.69
VF _{modelo t=5}	316.88	292.52	264.78	215.41	121.74	60.09	71.86	198.67	310.58	366.09	366.09	351.75	2936.46
VF _{modelo t=10}	319.68	296.91	271.48	219.12	126.20	69.55	61.19	196.66	343.33	366.09	366.09	350.73	2987.03
VF _{modelo t=15}	317.55	293.96	259.59	210.72	121.87	65.90	69.75	223.74	366.09	366.09	366.09	350.02	3056.7
E _{proyectado}	6.92	6.19	6.57	11.93	23.35	28.68	24.72	21.46	10.13	3.36	3.25	3.33	149.89
E _{real}	7.58	6.78	10.57	15.84	24.16	21.19	22.02	18.22	13.12	7.90	7.58	7.84	162.8
E _{modelo t=5}	7.25	6.49	8.06	13.23	24.01	24.53	23.80	20.25	12.31	6.68	5.42	5.70	157.73
E _{modelo t=10}	7.28	6.38	7.55	13.65	23.66	26.41	23.71	19.40	11.93	4.20	4.84	6.01	155.02
E _{modelo t=15}	7.22	6.51	9.62	14.42	23.81	24.83	23.71	20.54	11.69	6.64	5.38	5.63	160

4.3 Discusión de los resultados

La discusión de los resultados parte de la interpretación de los datos o resultados obtenidos de la simulación del modelo estocástico respecto al año hidrológico en tres escenarios con horizonte de tiempo de 5, 10 y 15 años, respectivamente, presentados en la Tabla 5. Para un mejor alcance de las tendencias, se ha propiciado ilustrar los valores en curvas para visualizar las tendencias de los parámetros proyectados, reales y del modelo, y a través de ellas realizar los comentarios respectivos.

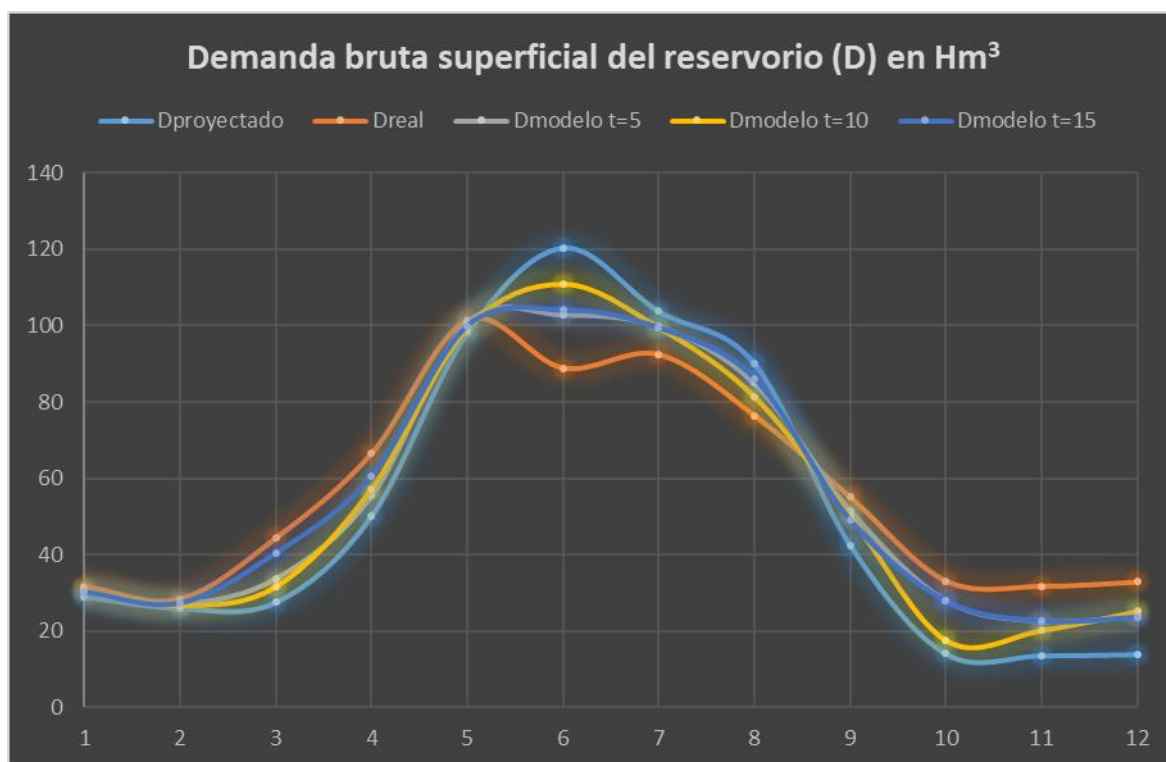
Figura 31 Curva de Oferta hídrica al 75% en Hm^3



La Figura 31 muestra la tendencia del parámetro de la oferta hídrica al 75% de persistencia en Hm^3 del modelo estocástico dados sus valores en función triangular respecto a los valores proyectados y reales con su respectiva moda o valor probable para tres escenarios con horizonte de tiempo de 5, 10 y 15 años, de lo cual se aprecia que la oferta hídrica del modelo respecto a la real tiene una brecha significativa en los meses de

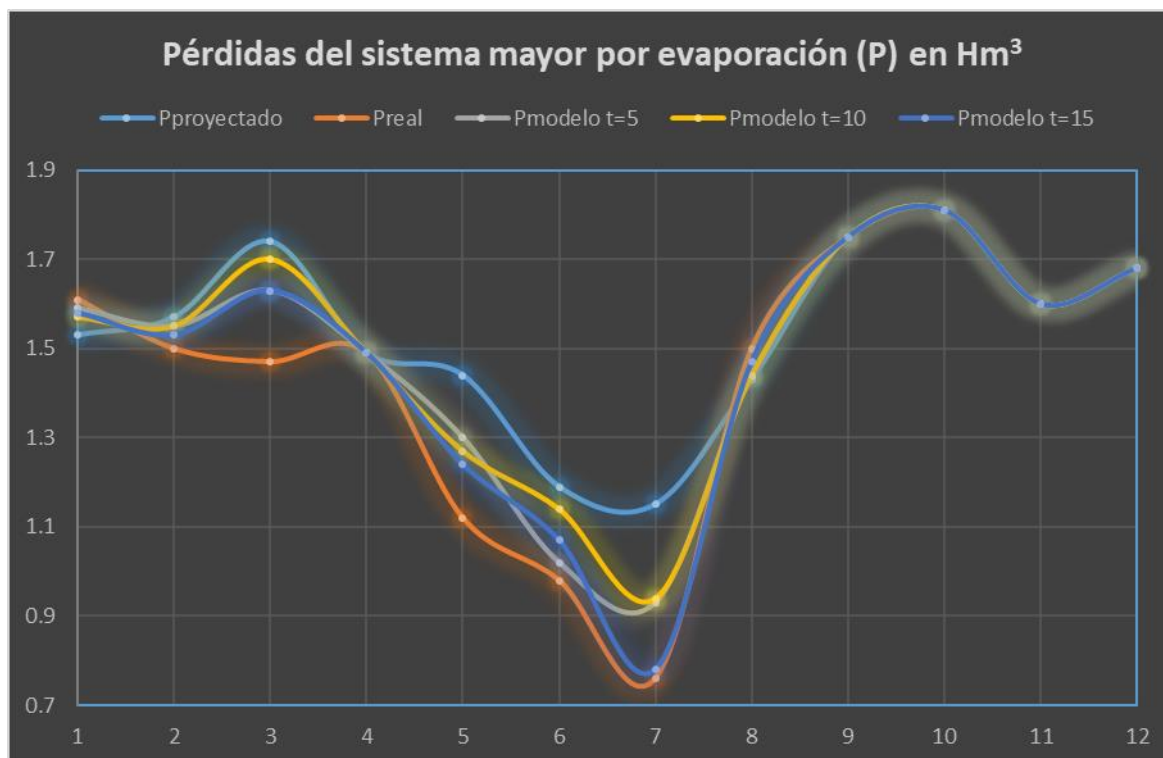
marzo y abril, siendo la curva más cercana a la real la oferta hídrica al 75% del horizonte de tiempo 15 años. Lo destacable del modelo estocástico es que mejora la tendencia de la curva proyectada.

Figura 32 Curva de Demanda bruta superficial del reservorio en Hm^3



La Figura 32 muestra la tendencia del parámetro de la demanda bruta superficial del reservorio en Hm^3 del modelo estocástico dados sus valores en función triangular respecto a los valores proyectados y reales con su respectiva moda o valor probable para tres escenarios con horizonte de tiempo de 5, 10 y 15 años, de lo cual se aprecia que la demanda bruta superficial del modelo respecto a la real tiene una brecha aproximada en todos los meses salvo ligeramente abierta en el mes de enero, y aunque la curva más cercana a la real sea el del horizonte de tiempo 5 años en el mes de enero, la que ha demostrado tendencia uniforme es la de 15 años. Lo destacable del modelo estocástico es que mejora la tendencia de la curva proyectada que se observa es muy dispersa.

Figura 33 Curva de Pérdidas del sistema mayor por evaporación en Hm^3



La Figura 33 muestra la tendencia del parámetro de las pérdidas del sistema mayor por evaporación en Hm^3 del modelo estocástico dados sus valores en función triangular respecto a los valores proyectados y reales con su respectiva moda o valor probable para tres escenarios con horizonte de tiempo de 5, 10 y 15 años, de lo cual se aprecia que las pérdidas del modelo respecto a la real tiene una brecha moderadamente significativa en los meses de octubre y diciembre, siendo la curva más cercana a la real el del horizonte de tiempo 15 años. Es importante mencionar que la curva del modelo en el horizonte de tiempo de 10 años presenta en la mayoría de los meses tendencia inferior a la de 5 años. Este impacto a priori inconsistente se complementa en otros parámetros, de alguna manera, absorbiendo sus indicadores negativos.

La Figura 34 y 35 muestran la tendencia del parámetro del déficit y superávit en Hm^3 del modelo estocástico, respectivamente, explicadas sus condiciones en la sección 3.5. En la tendencia del déficit real se aprecia que hay un desfase de 1 mes antes del déficit

proyectado, lo que sugiere una amplia dispersión de lo proyectado con los valores reales y que inducen a errores que podrían ser reducidos con el ajuste de sus valores respecto al modelo estocástico que en el horizonte de tiempo de 15 años obtiene una mejor aproximación de la curva real. En el superávit no se aprecia desfase, pero sí una brecha grande del real respecto el proyectado particularmente en el mes de marzo y abril del año 2, sin embargo, el modelo estocástico ha mostrado mejor tendencia en el horizonte de tiempo de 15 años. Lo notable de ambas condiciones es que el modelo ha presentado una mejor aproximación cuanto mayor es el número de años de simulación.

Figura 34 Curva de Déficit en Hm^3

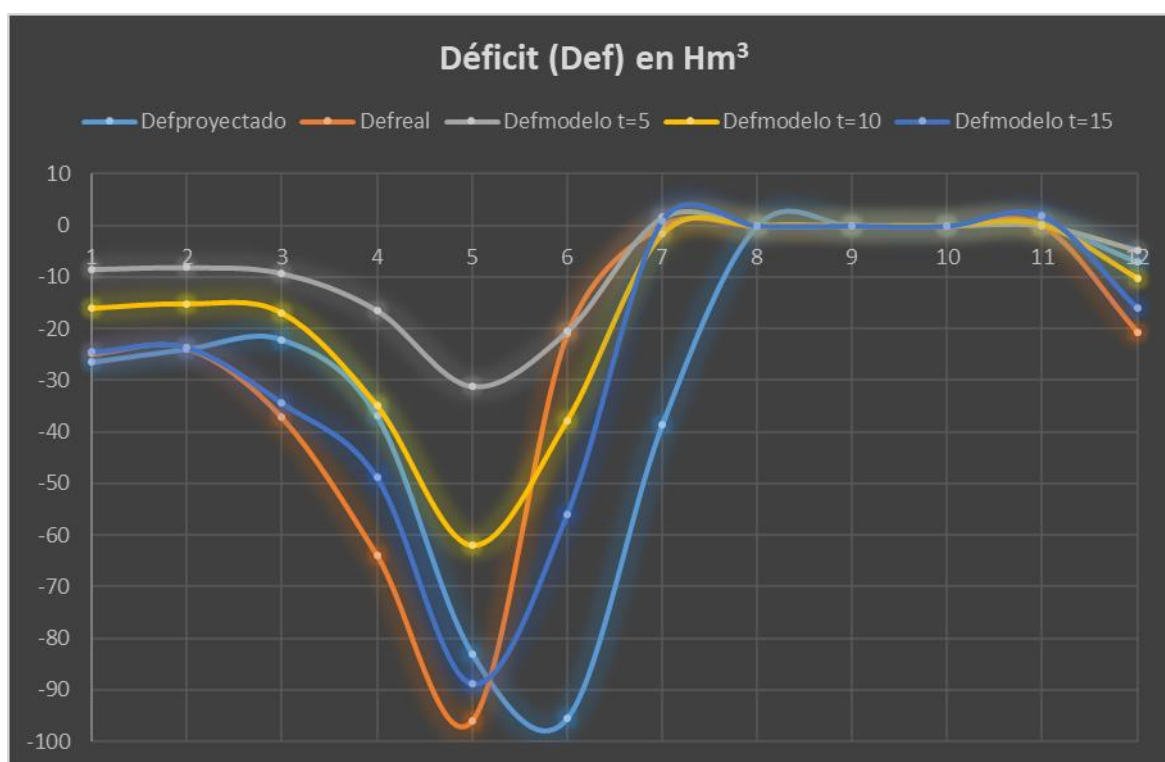
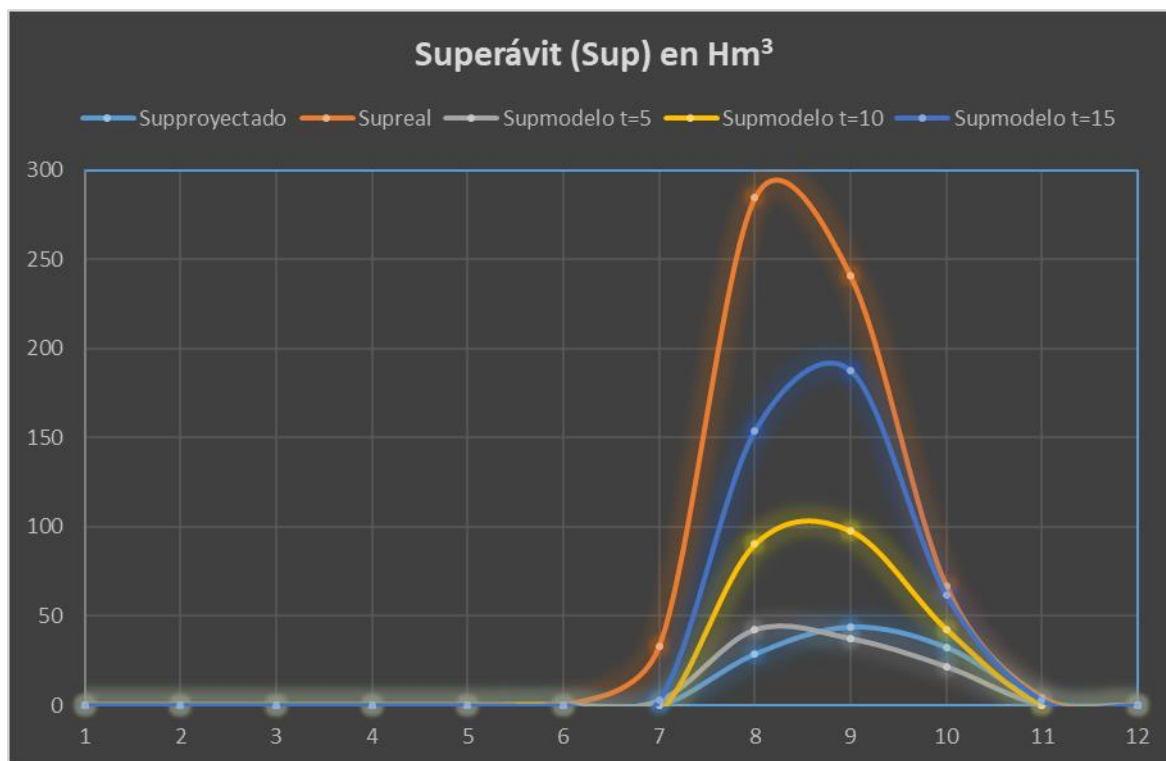


Figura 35 Curva de Superávit en Hm^3



La Figura 36 muestra la tendencia del parámetro de volumen útil del reservorio a inicio de mes en Hm^3 del modelo estocástico dados sus valores en función triangular respecto a los valores proyectados y reales con su respectiva moda o valor probable para tres escenarios con horizonte de tiempo de 5, 10 y 15 años, de lo cual se aprecia una gran brecha entre el volumen real con el proyectado principalmente desde el mes de abril hasta julio del año 2 y si bien las tres curvas del modelo estocástico sostienen una tendencia aceptable respecto del real, es el modelo estocástico en el horizonte de tiempo de 15 años con mejor tendencia porque en el mes de mayo se compensa lo que faltaría ajustar en abril en el año 2, dándole mejor ajuste sobre las otras. La misma situación es sobre la tendencia del parámetro de volumen útil del reservorio a fin de mes en Hm^3 , que muestra en la Figura 37 que le da mejor tendencia al modelo estocástico en el horizonte de tiempo de 15 años.

Figura 36 Curva de Volumen útil del reservorio a inicio de mes en Hm^3

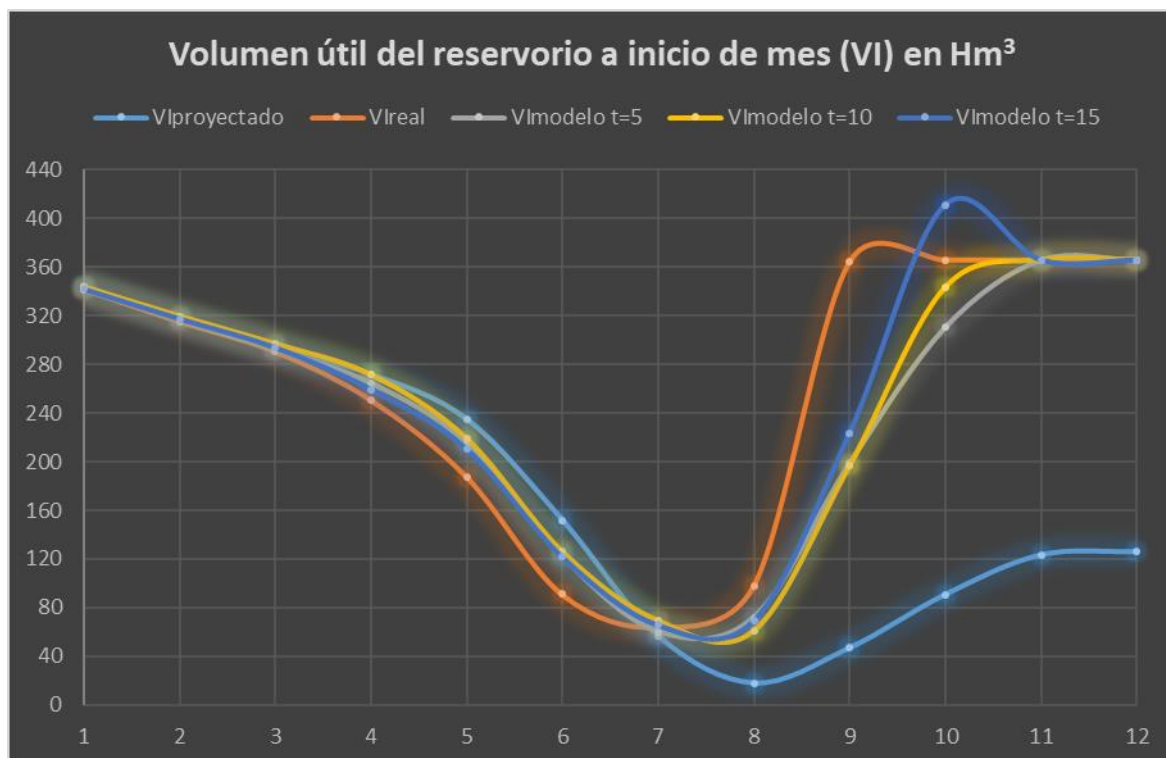
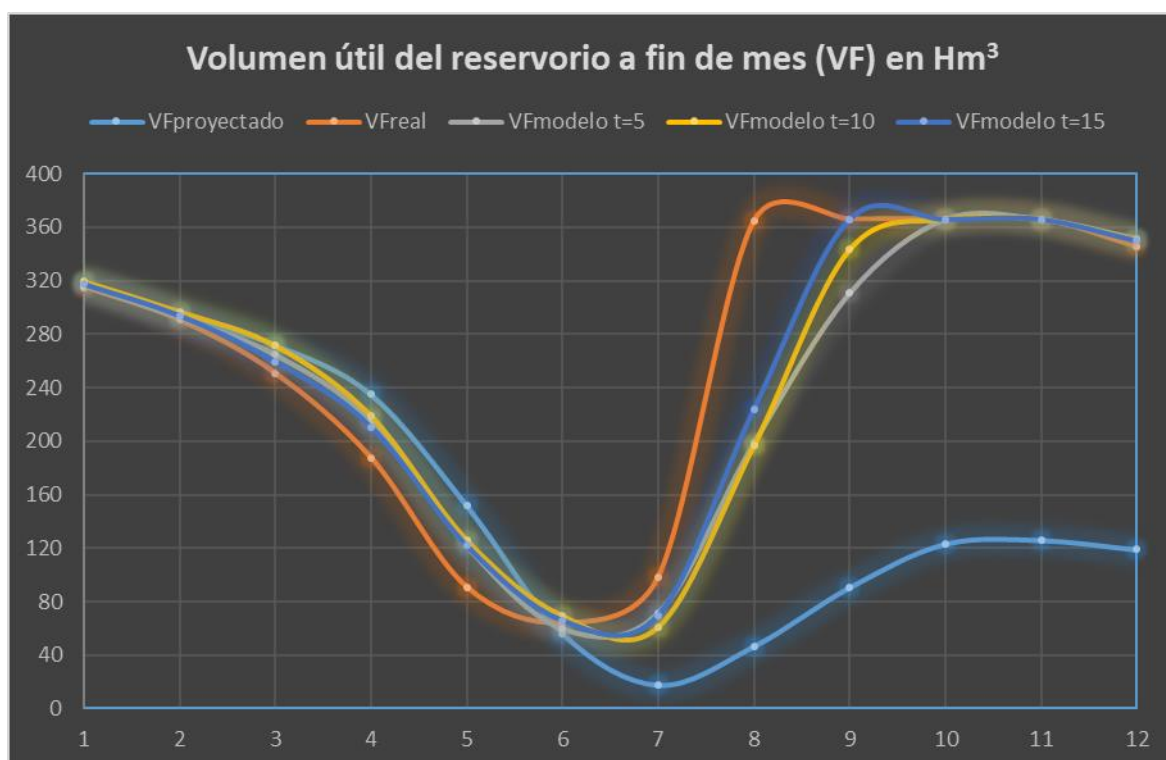
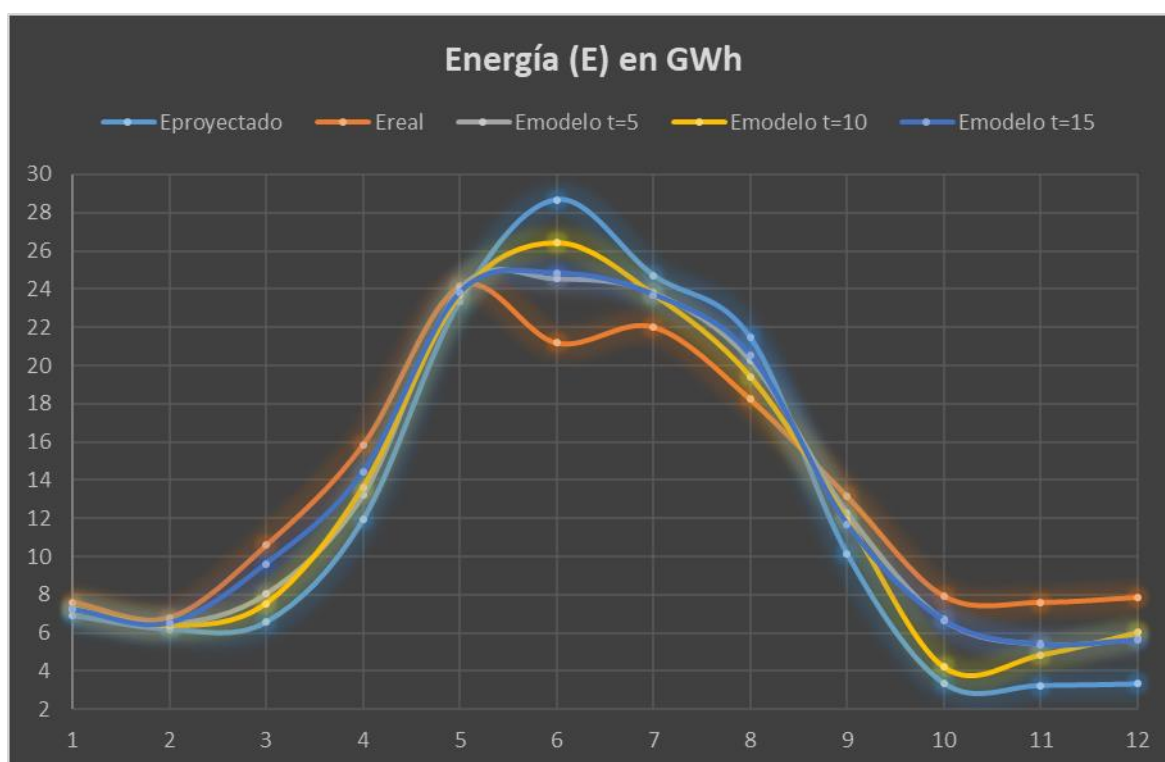


Figura 37 Curva de Volumen útil del reservorio a fin de mes en Hm^3



La Figura 38 muestra la tendencia del parámetro de Energía en GWh del modelo estocástico dados sus valores en función triangular respecto a los valores proyectados y reales con su respectiva moda o valor probable para tres escenarios con horizonte de tiempo de 5, 10 y 15 años, de lo cual se aprecia una considerable brecha entre la energía aproximadamente constante en su recorrido o desarrollo durante los 12 meses, sin embargo, respecto al modelo estocástico se aprecia una mejor aproximación en el horizonte de tiempo de 15 años y se muestra como un equilibrio entre la energía proyectado y el real en el mes de enero del año 2.

Figura 38 Curva de Energía en GWh



4.4 Contrastación de hipótesis

De la hipótesis general se contrasta con los resultados que la simulación estocástica mediante Simulación de Eventos Discretos ha permitido predecir con precisión las variaciones en los parámetros clave del embalse Gallito Ciego, como la oferta hídrica,

demanda, pérdidas por evaporación y volumen útil. La implementación del modelo en Arena ha demostrado ser efectiva en la optimización de la producción de energía eléctrica. Los resultados muestran que el modelo estocástico proporciona una predicción precisa, especialmente en horizontes de tiempo más largos, confirmando la hipótesis general.

Respecto a la primera hipótesis específica se tiene que el modelo matemático y la simulación estocástica han demostrado representar adecuadamente las fluctuaciones mensuales del volumen útil del embalse. Como se aprecia en las Figuras 36 y 37, el volumen útil a inicio y fin de mes presenta una tendencia que se ajusta bien a los datos reales en un horizonte de tiempo de 15 años. Las variaciones en la oferta hídrica, demanda y pérdidas por evaporación han sido capturadas con precisión por el modelo, confirmando la primera hipótesis específica.

Respecto a la segunda hipótesis específica se tiene que la simulación estocástica ha permitido cuantificar los impactos de los déficits y superávits en la capacidad de generación de energía. Las Figuras 34 y 35 muestran que el modelo estocástico ha podido mitigar los impactos de los déficits y superávits mediante una mejor aproximación a los valores reales. Las estrategias basadas en el análisis estocástico han demostrado ser efectiva en la gestión del embalse, confirmando la segunda hipótesis específica.

Respecto a la tercera hipótesis específica se tiene que los resultados del modelo lógico estocástico han mostrado una alta concordancia con los datos reales. Las curvas presentadas en las Figuras 31 a 38 indican que el modelo lógico estocástico proporciona una mejor aproximación a los valores reales que los proyectados. Esta alta concordancia sugiere que el modelo lógico es utilizado para ajustar los parámetros proyectados, mejorando la precisión y utilidad en la toma de decisiones para la gestión del embalse. Por lo tanto, la tercera hipótesis específica también se confirma.

4.5 Aporte

El principal aporte de esta investigación es el desarrollo de un modelo estocástico preciso para el embalse Gallito Ciego. Este modelo permite simular de manera realista las variaciones mensuales en la oferta hídrica, la demanda, las pérdidas por evaporación y el volumen útil del embalse. Utilizando técnicas de Simulación de Eventos Discretos, el modelo captura la incertidumbre y la variabilidad inherente a los sistemas hidrológicos, proporcionando una herramienta robusta para la toma de decisiones.

La investigación demuestra cómo el modelo estocástico optimiza la producción de energía eléctrica al predecir con precisión las variaciones en los caudales regulados. Esto permite ajustar las operaciones de turbinado y almacenamiento de agua para maximizar la eficiencia energética, reduciendo las pérdidas y mejorando la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda.

El modelo proporciona una base sólida para la gestión hídrica del embalse, ayudando a mitigar los impactos de los déficits y superávits de agua. Al cuantificar estos impactos y predecir su ocurrencia, los gestores del embalse implementan estrategias más efectivas para asegurar un suministro continuo y equilibrado de agua para riego y energía.

Uno de los hallazgos más significativos es que el modelo estocástico muestra una alta concordancia con los datos reales, superando a las proyecciones tradicionales. Esto permite ajustar los parámetros proyectados, mejorando la precisión y la utilidad de las predicciones para la gestión del embalse. La validación con datos históricos refuerza la confianza en el modelo y su aplicabilidad en escenarios futuros.

El modelo estocástico desarrollado en esta investigación se presenta como una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión del embalse Gallito Ciego. Permite a los gestores evaluar diferentes escenarios y estrategias operativas, facilitando la

planificación a largo plazo y la respuesta rápida a condiciones cambiantes. La capacidad de simular horizontes de tiempo de 5, 10 y 15 años proporciona una visión integral y anticipatoria, esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

La discusión de los resultados se basa en la interpretación de los datos obtenidos de la simulación estocástica, comparándolos con los valores proyectados y reales en horizontes de tiempo de 5, 10 y 15 años. Las figuras presentadas muestran cómo el modelo estocástico ofrece una mejor aproximación a los valores reales en comparación con las proyecciones tradicionales. A continuación, un resumen:

Oferta Hídrica: La curva de la oferta hídrica al 75% del modelo estocástico se aproxima más a los valores reales en un horizonte de 15 años, reduciendo la brecha observada en los meses críticos de marzo y abril.

Demanda Bruta Superficial: La demanda bruta superficial del modelo estocástico muestra una tendencia uniforme y más cercana a los valores reales, especialmente en un horizonte de 15 años.

Pérdidas por Evaporación: Las pérdidas por evaporación del modelo estocástico presentan una brecha menor respecto a los valores reales, con una mejor aproximación en el horizonte de 15 años.

Déficit y Superávit: Las condiciones de déficit y superávit de agua son mejor representadas por el modelo estocástico en horizontes de tiempo más largos, lo que permite ajustar las estrategias operativas para mitigar estos impactos.

Volumen Útil del Embalse: Tanto el volumen útil a inicio como a fin de mes muestran una mejor aproximación a los valores reales con el modelo estocástico, especialmente en el horizonte de 15 años.

Energía: La producción de energía modelada estocásticamente se equilibra mejor con los valores reales, proporcionando una herramienta precisa para la planificación energética.

Conclusiones

La conclusión general es que la investigación confirma que el comportamiento de los caudales regulados del embalse Gallito Ciego es analizado y optimizado estocásticamente mediante la Simulación de Eventos Discretos (DES). El modelo estocástico desarrollado permite predecir con precisión las variaciones en la oferta hídrica, demanda, pérdidas por evaporación y volumen útil del embalse, optimizando así la producción de energía eléctrica y mejorando la gestión hídrica. Los resultados muestran una alta concordancia con los datos reales, lo que valida la eficacia del modelo en la toma de decisiones operativas y estratégicas. La capacidad de simular diferentes horizontes temporales (5, 10 y 15 años) proporciona una herramienta robusta para la planificación a largo plazo, asegurando un uso sostenible y eficiente de los recursos hídricos. En resumen, la Simulación de Eventos Discretos se presenta como una metodología esencial para abordar la complejidad y variabilidad de los sistemas hidrológicos en la gestión del embalse Gallito Ciego.

Como conclusiones específicas se tienen:

- El modelo matemático y la simulación del comportamiento estocástico del volumen útil del embalse Gallito Ciego han demostrado ser capaces de representar adecuadamente las fluctuaciones mensuales del volumen del embalse. Al utilizar variables estocásticas para la oferta hídrica, demanda y pérdidas por evaporación, el modelo captura la variabilidad inherente del sistema hidrológico. Los resultados obtenidos muestran una alta precisión en la representación de los volúmenes mensuales, validando la hipótesis de que el DES es una herramienta efectiva para modelar estas fluctuaciones. Esto proporciona una base sólida para la planificación

operativa y estratégica del embalse, mejorando la gestión de los recursos hídricos y la eficiencia en la producción de energía.

- La investigación confirma que los déficits y superávits de agua en el embalse Gallito Ciego tienen un impacto significativo en la demanda y capacidad de generación de energía. Mediante la implementación de estrategias basadas en el análisis estocástico y la Simulación de Eventos Discretos, estos impactos son cuantificados y mitigados eficazmente. El modelo estocástico permite prever con antelación los períodos de déficit y superávit, facilitando la implementación de medidas correctivas y preventivas. Esta capacidad de anticipación y respuesta mejora la estabilidad y eficiencia operativa del embalse, asegurando un suministro continuo de agua y energía, y minimizando los riesgos asociados con las fluctuaciones hídricas.
- Los resultados del modelo estocástico han mostrado una alta concordancia con los datos reales, superando a los valores proyectados tradicionales. Esta validación confirma que el modelo lógico estocástico es una herramienta eficaz para ajustar los parámetros proyectados, mejorando la precisión y utilidad de las proyecciones en la gestión del embalse Gallito Ciego. La capacidad del modelo para reflejar con precisión los datos reales permite realizar ajustes finos en las estrategias de operación y gestión, aumentando la confiabilidad de las decisiones tomadas. Esta mejora en la precisión de las proyecciones contribuye significativamente a la sostenibilidad y eficiencia del embalse, optimizando el uso de los recursos hídricos y la producción de energía.

Recomendaciones

Las recomendaciones son:

- Incorporar variables climáticas como la precipitación y la temperatura en el modelo estocástico para evaluar su impacto en los caudales regulados y mejorar las predicciones, considerando los efectos del cambio climático en la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos del embalse.
- Desarrollar un modelo de optimización multicriterio que considere tanto la producción de energía como las necesidades agrícolas y ambientales, permitiendo una gestión más equilibrada y sostenible de los recursos hídricos, atendiendo a todos los sectores dependientes del embalse Gallito Ciego.
- Aplicar técnicas de aprendizaje automático para mejorar la precisión de las predicciones y la eficiencia del modelo estocástico, utilizando grandes volúmenes de datos históricos y en tiempo real para ajustar continuamente el modelo y responder a cambios dinámicos en el sistema hidrológico.

Referencias Bibliográficas

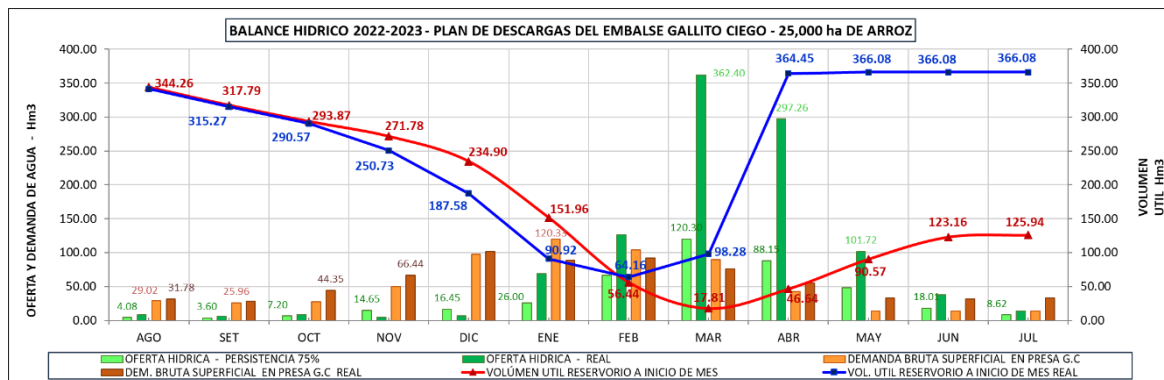
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Jequetepeque. http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/erhjequetepeque_2015_superficiales.pdf
- Bellin, A., Majone, B., Cainelli, O., Alberici, D., & Villa, F. (2016). A continuous coupled hydrological and water resources management model. *Environmental Modelling & Software*, 75, 176–192. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.10.013
- Fruchart, F. & Camenen, B. (2012). Reservoir Sedimentation Different Type of Flushing – Friendly Flushing Example of Genissiat Dam Flushing. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00761305/document>
- Gabriel Martin, I., Sordo Ward, A., Garrote, L., & Castillo, L. G. (2017). Influence of initial reservoir level and gate failure in dam safety analysis. Stochastic approach. *Journal of Hydrology*, 550, 669–684. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.032
- Gabriel Martin, I., Sordo Ward, A., Garrote, L., & Granados, I. (2019). Hydrological Risk Analysis of Dams: The Influence of Initial Reservoir Level Conditions. *Water*, 11(3), 461. doi: 10.3390/w11030461
- Gabriel Martín, Iván (2020). Incorporation of Operational Variables in Stochastic Hydrological Dam Safety Analysis. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). doi: 10.20868/UPM.thesis.65645.
- García Romero, L. (2020). Propuesta y análisis de metodologías para la evaluación de recursos hídricos mediante modelos precipitación-escorrentía [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. doi: 10.4995/Thesis/10251/153150

- García Romero, L. (2020). Propuesta y análisis de metodologías para la evaluación de recursos hídricos mediante modelos precipitación-escorrentía [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. doi: 10.4995/Thesis/10251/153150
- Guasch, A., Piera, M., Casanovas, J. y Figueras, J. (2002). Modelado y simulación: Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. Barcelona: Ediciones UPC. ISBN: 84-8301-577-3
- Ko, A., Mascaro, G., & Vivoni, E. R. (2019). Strategies to Improve and Evaluate Physics-Based Hyperresolution Hydrologic Simulations at Regional Basin Scales. *Water Resources Research*. doi:10.1029/2018wr023521
- Martínez Fernández, Vanesa (2018). Fluvial corridors in rivers regulated by large dams: automatic segmentation and bio-geomorphic responses = Riberas fluviales en ríos regulados por grandes presas: delineación automática y respuestas bio-geomorfológicas. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural (UPM). doi: 10.20868/UPM.thesis.52987
- Montes Marroyo, J. (2019). Análisis regional de frecuencia de caudales punta en la vertiente cantábrica y noratlántica de la Península Ibérica [Tesis doctoral]. Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/26611>
- Moreno, A. (2008). Proyecto “Obras de control y medición de agua por bloques de riego en el valle Jequetepeque regulado”. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2235>
- Pan, L., Housh, M., Liu, P., Cai, X., Chen, X. (2015). Robust stochastic optimization for reservorio operation. *Water Resour. Res.*, 51, 409–429. doi:10.1002/2014WR015380
- PEJEZA (2015). Operación y mantenimiento de la presa Gallito Ciego. Recuperado de http://www.pejeza.gob.pe/pdf/SEDIMENTACION_EMBALSE_GC.pdf
- PEJEZA (s.f.) Circuito Turístico. Disponible en <http://www.pejeza.gob.pe/circuito.php>

- Rojas, G. (2008). Manejo y aprovechamiento del agua en la cuenca del río Jequetepeque. Proyecto especial Jequetepeque - Zaña, 10 (2), 159-170. <https://xdoc.mx/documents/manejo-y-aprovechamiento-del-agua-en-la-cuenca-del-rio-5e4d9b2e7b0e2>
- Romero Cuellar, J. (2019). Improving hydrological post-processing for assessing the conditional predictive uncertainty of monthly streamflows [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. doi: 10.4995/Thesis/10251/133999
- Sialer, C. (2021). Operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica mayor. Foro Infraestructura Hidráulica. Universidad Cesar Vallejo.
- SENAMHI (s.f.). Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. Disponible en <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>
- Yali Samaniego, R. (2018). Modelo de erosión Rusle y coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) para la estimación del volumen muerto de reservorios, caso de estudio: reservorio Gallito Ciego [Tesis de título profesional]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10078>
- Falcetta, Filipe Antonio Marques (2020) Restrições de vazões mínimas e o planejamento da operação de sistemas de usinas hidroelétricas [Tese doutoral]. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.106.2020.tde-22122020-145904>
- Zambom, R.C. (2008) Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de grande porte [Tese doutoral]. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Anexos

Anexo 1: Balance hídrico 2022-2023



Anexo 2: Oferta hídrica 2022-2023

