

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



Tesis

**Generación de caudales mediante la aplicación de modelos hidrológicos
en la cuenca del río Pachachaca**

Asesor:

Mg. Sc. Maldonado Mendivil Ángel

Autor:

Peña Arbieta Clever

Para optar al título profesional de: Ingeniero Agrónomo

Abancay – Apurímac – Perú

2024

Acta de sustentación



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



Acta N°: 009

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los 20 días del mes de diciembre del 2024, siendo las 10:00 amhoras, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 197-2024-UTEA-FI-DEPA de la Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Dr.C. Alarcón Camacho Juan
Dictaminante:	Ph.D. Vásquez Ramírez Abbon Alex
Replicante :	M.Sc. Yanqui Diaz Franklin

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Generación de caudales mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del rio Pachachaca

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Peña Arbieto Clever
(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Agrónomo

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S)**:

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. Peña Arbieto Clever	Aprobado

Siendo las 12:30 pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dr.C. Alarcón Camacho Juan
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

Dictaminante: Ph.D. Vásquez Ramirez Abbon Alex
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

Replicante: M.Sc. Yanqui Diaz Franklin
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud






12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 9%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Peña Arbieto Clever
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	40416438
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0006-4365-2190
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Maldonado Mendivil Ángel
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad	:	06788424
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Agronomía
Línea de investigación	:	Agricultura y Ambiente
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2024
Fuente de financiamiento	:	Recursos propios
Porcentaje de similitud	:	12%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.06

Dedicatoria

Agradecer a Dios por permitirme llegar hasta este momento con salud y vida y cumplir mis metas trazados.

Agradecer a mi señora madre Luisa Arbieto Chipana por haberme dado la vida y haberme enseñando que las cosas, uno las consigue con esfuerzo y dedicación, y que puedes cumplir todas las metas que te propones y ser una persona de bien para el futuro.

A mi familia mi esposa Luz Marina Caballero Espinoza, mis hijas Ylla Mayhua Peña Caballero, Shaya Sisa Peña Caballero, por estar junto conmigo en este proceso de alcanzar mis metas y seguir acompañándome en mis logros presentes y futuros.

Clever

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Tecnológica de los Andes, a los docentes de la escuela profesional de agronomía por las enseñanzas y conocimientos compartidos durante mi permanencia en las aulas de esta casa de estudios.

Agradezco al Ing. M. Sc. Ángel Maldonado Mendivil por su asesoramiento y apoyo desinteresado, así como por su tiempo y paciencia al compartir su conocimiento durante el proceso de elaboración de la presente tesis. Sus valiosas sugerencias y las correcciones recomendadas fueron fundamentales para la conclusión de la tesis.

Clever

Resumen

Este estudio analiza el uso de los modelos hidrológicos GR4J y HBV en la cuenca del río Pachachaca con el objetivo de calcular los flujos y evaluar su eficacia en diversas condiciones hidrológicas. Se emplearon datos diarios de hidrometeorología del periodo 2019-2023, en dos grupos, uno del 60% para la calibración y el segundo del 40% para la validación. El rendimiento de los modelos se evaluó a través de indicadores estadísticos como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el coeficiente de Pearson y el error medio cuadrático relativo (RRMSE).

Los resultados indicaron que el modelo GR4J presentó limitaciones en la simulación de caudales, especialmente en eventos extremos, mostrando bajos valores en los indicadores de desempeño. Por otro lado, el modelo HBV mostró un rendimiento moderadamente mejor durante la calibración, pero con dificultades en la validación, lo que comprueba limitaciones en su capacidad de generalización.

Los hallazgos destacan la complejidad hidrológica de la cuenca del río Pachachaca la necesidad de mejorar los procesos de modelación hidrológica mediante la incorporación de datos más detallados y métodos de calibración avanzados. Esta investigación proporciona información clave para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca y la selección de modelos hidrológicos adecuados para condiciones similares.

Palabras clave: Generación, caudales, aplicación, modelos, hidrológicos.

Abstract

This study analyzes the use of the GR4J and HBV hydrological models in the Pachachaca River basin to calculate flows and evaluate their effectiveness under various hydrological conditions. Daily hydrometeorological data from the (2019 - 2023) period were used, divided into two groups: 60% for calibration and 40% for validation. Model performance was evaluated using statistical indicators such as the Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency, the Pearson coefficient, and the relative root mean square error (RRMSE).

The results indicated that the GR4J model presented limitations in flow simulation, especially during extreme events, showing low values for the performance indicators. On the other hand, the HBV model showed moderately better performance during calibration but with difficulties during validation, which demonstrates limitations in its generalization capacity.

The findings highlight the hydrological complexity of the Pachachaca River basin and the need to improve hydrological modeling processes by incorporating more detailed data and advanced calibration methods. This research provides key information for water resource management in the basin and the selection of appropriate hydrological models for similar conditions.

Keywords: Generation, flows, application, models, hydrological.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen.....	vii
Abstract	viii
Índice.....	ix
Índice de tablas.....	xii
Índice de figuras	xiii
I. Introducción.....	15
II. Planteamiento del problema	16
2.1. Descripción y formulación del problema	16
2.1.1. <i>Problema general</i>	17
2.1.2. <i>Problemas específicos</i>	17
2.2. Objetivos	17
2.2.1. <i>Objetivo general</i>	17
2.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	17
2.3. Justificación e importancia	17
2.4. Hipótesis	18
2.4.1. <i>Hipótesis general</i>	18

2.4.2. Hipótesis específicas	18
2.5. Variable	19
2.5.1. Variable 01	19
2.5.2. Variable 02	19
2.5.3. Operacionalización de variables	20
III. Marco Teórico	21
3.1. Antecedentes.....	21
3.2. Bases teóricas	28
3.2.1. Modelo hidrológico	28
3.2.2. Calibración manual y automática del modelo hidrológico	31
3.2.3. Modelo HBV	33
3.2.4. Modelo GR4J.....	34
3.3. Definiciones de términos.....	36
IV. Metodología	39
4.1. Tipo y nivel de investigación	39
4.1.1. Tipo de investigación.....	39
4.1.2. Nivel de investigación.....	39
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	39
4.2.1 Ámbito temporal	39
4.2.2. Ámbito espacial.....	39
4.3. Población y muestra	39
4.3.1. Población	39

4.3.2. Muestra	41
4.4. Instrumentos.....	41
4.5. Procedimientos	42
4.6. Análisis estadístico de datos.....	48
4.7. Implementación y evaluación del modelo hidrológico GR4J	48
4.8. Implementación y evaluación del modelo hidrológico HBV	52
V. Resultados y discusión	57
5.1. Resultados	57
5.1.1. Modelo GR4J	57
5.1.2. Modelo HBV.....	58
5.1.3. Comparación entre modelos	59
5.2. Discusiones	59
VI. Conclusiones	62
VII. Recomendaciones.....	63
VIII. Referencias	64

Índice de tablas

Tabla 1

Operacionalización de las variables de investigación20

Tabla 2

Valor ideal de los indicadores estadísticos empleados en la medición del rendimiento de los modelos hidrológicos47

Tabla 3

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de calibración del modelo GR4J.49

Tabla 4

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de validación del modelo GR4J.51

Tabla 5

Parametros calibrados del modelo GR4J.52

Tabla 6

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de calibración del modelo HBV.53

Tabla 7

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de validación del modelo HBV.55

Tabla 8

Parametros calibrados del modelo HBV.56

Índice de figuras

Figura 1

Relación entre las características espacio - temporal de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos.....29

Figura 2

Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos.....29

Figura 3

Clasificación de los modelos hidrológicos según su representatividad espacial.30

Figura 4

Procedimientos de calibración manual de un modelo de simulación.....32

Figura 5

Proceso de calibración automática de un modelo de simulación.33

Figura 6

Estructura del modelo HBV.....34

Figura 7

Descripción modelo GR4J.35

Figura 8

El rendimiento de los modelos hidrológicos se compara utilizando parámetros de rendimiento.....36

Figura 9

Delimitación del área de estudio.40

Figura 10

Esquema topológico del modelo GR4J.....42

Figura 11

Esquema topológico del modelo HBV.....43

Figura 12	
	Serie histórica de precipitación diaria y de variabilidad en la estación Abancay.....44
Figura 13	
	Serie Histórica de precipitación diaria y de variabilidad en la estación Antabamba.45
Figura 14	
	Serie histórica de precipitación diaria y de variabilidad en la estación Chalhuanca.46
Figura 15	
	Serie histórica del caudal de referencia.47
Figura 16	
	Serie temporal de caudal con periodos de calibración y validación.....48
Figura 17	
	Resultado del proceso de calibración del modelo GR4J.50
Figura 18	
	Resultados del proceso de validación del modelo GR4J.....52
Figura 19	
	Resultado del proceso de calibración del modelo HBV.54
Figura 20	
	Resultado del proceso de validación del modelo HBV.55

I. Introducción

Con el fin de evaluar qué tan bien los modelos hidrológicos, especialmente el HBV y el GR4J, simulan los flujos bajo diversas condiciones hidrológicas, este estudio realiza una investigación exhaustiva de su uso en la cuenca del río Pachachaca. La investigación se desarrolla a partir de una recopilación detallada de datos meteorológicos e hidrológicos, seguida de una fase de calibración y la otra fase de validación de los modelos mencionados. Se ha prestado especial atención a la selección de parámetros y a la metodología de ajuste para asegurar la representación más fidedigna posible de los procesos hidrológicos de la cuenca. Este proceso implicó un análisis riguroso de las series temporales de precipitaciones y de la evapotranspiración. La evaluación comparativa de la eficacia de los modelos GR4J y HBV es un elemento clave del estudio. En esta investigación se utilizaron indicadores de rendimiento hidrológico, como el índice de volumen, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el error cuadrático medio. Los resultados obtenidos permitieron identificar las fortalezas y debilidades de cada modelo en el contexto específico de la cuenca del río Pachachaca, proporcionando así una base sólida para la selección del modelo más apropiado según las características particulares de cualquier cuenca hidrográfica. En la práctica, los resultados de este estudio proporcionan factores a tener en cuenta al momento de seleccionar un modelo hidrológico que pueda apoyar la planificación y gestión de los recursos hídricos, permitiendo a los tomadores de decisiones crear planes más eficientes para la reducción de riesgos y la adaptación al cambio climático.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

Generación de caudales, es un tema crítico de gran importancia para la gestión sostenible de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica. En este sentido, la implementación de los modelos hidrológicos se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis y predicción de los caudales de ríos y riachuelos, especialmente en zonas con recursos limitados para el monitoreo hidrológico.

En cuanto a la cuenca fluvial en concreto del río Pachachaca, la generación de caudales es un desafío crítico debido a su compleja topografía y a las características hidrológicas de la región, en consecuencia, uno de los mayores problemas que enfrenta la cuenca pluvial del río Pachachaca es la variabilidad climática la falta de información hidrológica confiable, lo que hace difícil, la toma de decisiones informada en torno a la gestión de los recursos hídricos hace de la cuenca hidrográfica.

La aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del río Pachachaca puede proporcionar información valiosa para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región. Sin embargo, su implementación presenta desafíos importantes debido a la complejidad de la topografía y la falta de información hidrológica precisa y confiable. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un estudio detallado de la cuenca, que permita recopilar y analizar información hidroclimática, a fin de desarrollar modelos hidrológicos precisos y confiables.

Es importante destacar que el uso de modelos hidrológicos para generar caudales no es una solución única para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del río Pachachaca.

Del contexto citado, se plantean las siguientes interrogantes:

2.1.1. Problema general

Luego de su aplicación, calibración y validación, ¿qué tan bien pueden los modelos hidrológicos GR4J y HBV producir flujos en la cuenca del río Pachachaca?

2.1.2. Problemas específicos

- ¿Qué tan bien genera el modelo hidrológico GR4J los caudales en la cuenca del río Pachachaca?
- ¿Qué tan bien genera el modelo hidrológico HBV los caudales en la cuenca del río Pachachaca?
- ¿En qué se diferencian los caudales generados por los modelos GR4J y HBV en cuanto a precisión y representatividad en la cuenca del río Pachachaca?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Generar caudales en la cuenca del río Pachachaca mediante la aplicación, calibración y evaluación comparativa de los modelos hidrológicos GR4J y HBV. En la cuenca del río Pachachaca

2.2.2. Objetivos específicos

Para generar caudales en la cuenca del río Pachachaca, utilice y calibre el modelo hidrológico GR4J.

Para generar caudales en la cuenca del río Pachachaca, utilice y calibre el modelo hidrológico HBV.

Para determinar la precisión y la capacidad de representación de los modelos GR4J y HBV, compare su rendimiento mediante métricas estadísticas.

2.3. Justificación e importancia

Para la gestión sostenible del agua, la modelación hidrológica es una herramienta esencial, especialmente en zonas donde la toma de decisiones se ve obstaculizada por la variabilidad climática y la falta de datos hidrológicos. Este estudio es importante porque nos permite evaluar la precisión e idoneidad de los modelos

hidrológicos GR4J y HBV en la cuenca del río Pachachaca, un lugar crítico para la agricultura y el abastecimiento de agua de la región Apurímac.

Al analizar los efectos de factores como la temperatura, la evapotranspiración y la precipitación en la producción de caudal, este estudio avanza en nuestro conocimiento científico de la dinámica hidrológica de la cuenca. Además, se establecerá una base metodológica para futuros estudios en la cuenca con características comparables comparando los modelos GR4J y HBV para determinar cuál es el más apropiado para representar los procesos hidrológicos en la región.

Los hallazgos de este estudio afectan directamente a la gestión de los recursos hídricos desde un punto de vista práctico. Las autoridades y organizaciones a cargo de la gestión del agua contarán con datos más precisos para la planificación del uso de los recursos, el diseño de infraestructura hidráulica y la mitigación de desastres, incluidas sequías e inundaciones, gracias a modelos calibrados y evaluados.

Debido a que no sólo apoya el uso de modelos hidrológicos en la zona, sino que también proporciona recursos para mejorar la planificación y gestión del agua en la cuenca del río Pachachaca, esta investigación les permite, tanto para académicos como para gestores ambientales.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La cuenca del río Pachachaca puede generar caudales con niveles de precisión que pueden ser evaluados mediante indicadores estadísticos de desempeño gracias al uso de los modelos hidrológicos GR4J y HBV en la cuenca.

2.4.2. Hipótesis específicas

Los caudales de la cuenca del río Pachachaca se pueden generar mediante el uso del modelo hidrológico GR4J; se puede utilizar medidas estadísticas para evaluar la precisión de estos caudales.

La cuenca del río Pachachaca puede generar caudales mediante el uso del modelo hidrológico HBV, y el comportamiento de estos caudales puede analizarse utilizando indicadores de error y ajuste.

2.5. Variable

Existen diferencias entre el desempeño de los modelos GR4J y HBV al generar caudales en la cuenca del río Pachachaca, las cuales pueden compararse utilizando los coeficientes de correlación, eficiencia y error.

2.5.1. Variable 01: generación de caudales

- **Definición conceptual: Chow, (2000).** Menciona que el volumen de agua que se mueve a través de un segmento de canal en un tiempo determinado se conoce como caudal, flujo o descarga.

- **Definición operacional:** Se calcula multiplicando el área de la sección (m^2) por la velocidad del agua (m^3/s). por consiguiente, esta característica solo se replica a los sistemas de aguas corrientes, como ríos, arroyos y barrancos.

2.5.2. Variable 02: Modelos hidrológicos.

- **Definición conceptual: Ali et al, (2023).** Afirma que, una herramienta ideal para la gestión de los recursos hídricos es un modelo hidrológico. El comportamiento de los procesos hidrológicos en una cuenca, como la precipitación, la escorrentía, la infiltración y la evaporación, pueden simularse mediante estos modelos, que se basan en conceptos matemáticos y físicos.

- **Definición operacional:** Se utilizó el Modelo hidrológico GR4J y el Modelo hidrológico HBV para pronosticar caudales diarios en las siguientes características:

- Capacidad máxima de un almacén de fabricación
- El coeficiente de intercambio de agua de la cuenca
- Capacidad máxima del depósito de ruta en un solo día
- Base temporal del hidrograma unitario HU1

2.5.3. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de las variables de investigación

VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD
V.1. Modelos hidrológicos	- GR4J - HBV	Caudales simulados.	- m ³ /s
	- Calibración - Validación	- Ajuste de parámetros - Comparación con datos observados	- Sin unidad
V.2. Generación de caudales	- Precisión	- Nash-Sutcliffe (NSE) - Coeficiente de Pearson - RRMSE	- Valor - Valor - % o valor

Nota. Elaboración propia.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

Mohammadi et al. (2022). Desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue aplicar tres modelos basados en procesos hidrológicos, a saber: IHACRES, GR4J y MISD, para simular escorrentía en una cuenca cubierta de nieve en Suiza. En este estudio se desarrollaron modelos conceptuales junto con variables hidrometeorológicas para construir modelos de perceptron multicapa (MLP) y máquina de vectores de soporte (SVM). En la etapa final del procedimiento de modelado, se implementó el enfoque de aprendizaje automático de fusión de datos mediante el uso de los resultados de los modelos MLP y SVM para desarrollar dos modelos evolutivos de fusión MLP y algoritmo híbrido de optimización de ballenas MLP (MLP-WOA). Como resultado de los modelos conceptuales, el modelo basado en IHACRES simuló mejor el proceso de lluvia escorrentía en comparación con los modelos GR4J y MISD. También se investigó el efecto de incorporar variables meteorológicas en los modelos acoplados basados en procesos hidrológicos y de aprendizaje automático donde la precipitación, velocidad del viento, humedad, temperatura y profundidad de nieve se agregaron por separado a cada modelo hidrológico. Se encontró que la incorporación de variables meteorológicas en los modelos hidrológicos aumentó la precisión de los modelos en la simulación de ejecución. En el estudio actual se aplicaron con éxito tres fases de aprendizaje diferentes para mejorar la precisión de la simulación de ejecución máxima. Este estudio demostró que la fase uno (solo modelo hidrológico) tiene un gran error, mientras que la fase tres (acoplamiento del modelo hidrológico con el modelo de aprendizaje automático) dio un error mínimo en la estimación de escorrentía en una cuenca cubierta de nieve. El modelo MLP-WOA basado en IHACRES con RMSE de $8.49 \text{ m}^3/\text{s}$ mejoró el rendimiento del modelo IHACRES ordinario en un factor de casi el 27%. Puede considerarse como un logro satisfactorio en este estudio para estimar la escorrentía mediante modelos hidrológicos integrados conceptuales-ML.

La metodología recomendada en el estudio para el modelado de lluvia escorrentía puede motivar su aplicación en problemas hidrológicos alternativos.

Kumari et al, (2021). En su investigación llevado a cabo en la cuenca del río Kangsabati en la India tuvieron como objetivo identificar modelos hidrológicos adecuados para la evaluación de caudales mediante el uso de diferentes puntajes de selección. En este estudio, se usaron 13 criterios diferentes para los puntajes de selección del modelo, incluidas las resoluciones temporales y espaciales, y los procesos involucrados. Posteriormente, con base en diferentes puntajes, fueron seleccionados dos modelos hidrológicos diferentes para la predicción del caudal en la cuenca del río Kangsabati (KRB) en el este de la India, a saber (1) Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), un modelo conceptual modelo, y (2) Capacidad de Infiltración Variable (VIC), un modelo semi-distribuido. Los modelos se calibraron contra el flujo de corriente observado diariamente en KRB superior (embalse) y KRB inferior (Mohanpur) de 2000 a 2006 y validados durante el período de 2008 a 2010. A pesar de las diferencias en la estructura del modelo y los datos utilizados, ambos modelos simularon el flujo de corriente en una escala de tiempo diaria con coeficiente de Nash-Sutcliffe que va desde 0.71 a 0.82 para el modelo VIC y 0.63 a 0.71 para el GR4J. Debido a la estructura más simple, la naturaleza parsimoniosa, menos parámetros y una precisión razonable, los resultados sugieren que un modelo conceptual de lluvia – escorrentía como GR4J puede usarse en condiciones de datos insuficientes.

Wei et al, (2021). En su trabajo de investigación plantearon como objetivo mejorar la eficiencia de predicción hidrológica basada en clasificación meteorológica mediante el uso del valor del índice de escorrentía estandarizado (SRI) para identificar tres categorías, es decir, los años secos, normales y húmedos. Se adoptan entonces tres esquemas de simulación diferentes para estas categorías y, en cada categoría, los datos hidrológicos de dos años con valores SRI similares se dividen en un conjunto; luego, los datos de un año se utilizan como período de calibración, mientras que el otro año es para la prueba.

Se seleccionó como modelo experimental el modelo lluvia – escorrentía Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), con 4 parámetros x_1 , x_2 , x_3 y x_4 . El método de estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada (GLUE) se utiliza para evitar la equifinalidad de los parámetros.

Se utilizaron tres cuencas en Australia como estudios de caso. Como era de esperar, los resultados indican que la distribución de cuatro parámetros del modelo GR4J es significativamente diferente bajo diversas condiciones meteorológicas. La eficiencia de predicción en el período de prueba basada en la clasificación meteorológica es mayor que la del modelo tradicional en todas las condiciones meteorológicas. Se indica que el modelo lluvia-escorrentía debe calibrarse con un año SRI similar en lugar de todos los años, en período de prueba de tres cuencas en estudio, los coeficientes de eficiencia de predicción se incrementaron en un 107 %, 104 % y 55,6 %, respectivamente. Este estudio proporciona un nuevo método para mejorar la eficiencia de la predicción hidrológica para la cuenca.

Kunnath-Poovakka y Eldho, (2019). En su trabajo de investigación plantearon como objetivo comparar el rendimiento de tres modelos conceptuales GR4J, Australian Water Balance Model (AWBM) y Sacramento para la simulación de escorrentía. Para este estudio se seleccionan cuatro cuencas pequeñas y una cuenca mediana en la cuenca superior del río Godavari.

Los principales datos de entrada de estos modelos son datos de precipitación diaria y evapotranspiración potencial (PET) medida en la misma cuenca o ubicación adyacente. Estos modelos se calibran utilizando la eficiencia diaria de Nash-Sutcliffe (NSE) con penalización por sesgo como función objetivo.

Los modelos GR4J, AWBM y Sacramento tienen cuatro, ocho y veintidós parámetros, respectivamente, para optimizar durante la calibración. Se calculan varias medidas estadísticas como NSE, el coeficiente de determinación, el sesgo y el coeficiente de correlación lineal para evaluar la eficacia de las predicciones de escorrentía del modelo. Para todas las cuencas, el NSE fue cercano o superior a 0,5

como en el período de calibración y validación. Durante la validación, GR4J proporcionó un NSE ligeramente mejor que AWBM y Sacramento para todas las cuencas excepto Adhala y estuvo por encima de 0,5 en todos los casos. El NSE mensual para el modelo GR4J fue de alrededor de 0,8 para la mayoría de los casos. Todos los modelos proporcionaron R mayor o igual a 0,7 como para el período de calibración y validación. A partir de los resultados obtenidos, se encuentra que todos los modelos brindan resultados satisfactorios en las cuencas seleccionadas en este estudio. Sin embargo, se encuentra que el rendimiento del modelo GR4J es más apropiado en términos de predicción y eficiencia computacional en comparación con los modelos AWBM y Sacramento.

Ali et al, (2018). En su trabajo de investigación empleó el modelo Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdeling (HBV) Light evaluar el rendimiento del modelo en respuesta al cambio climático en el área de captación nevada y glaciado de la cuenca del río Hunza. El estudio tuvo como objetivo comprender la variación temporal del caudal del río Hunza y su contribución al sistema del río Indo (IRS).

El modelo HBV se desempeñó bastante bien tanto durante la calibración ($R^2 = 0.87$, $R_{eff} = 0.85$, $PBIAS = -0.36$) como durante la validación ($R^2 = 0.86$, $R_{eff} = 0.83$, $PBIAS = -13.58$) en la escala de tiempo diaria en Hunza Cuenca del río.

El modelo se desempeñó mejor en la escala de tiempo mensual con un período de flujo bajo ligeramente subestimado durante la calibración ($R^2 = 0.94$, $R_{eff} = 0.88$, $PBIAS = 0.47$) y validación ($R^2 = 0.92$, $R_{eff} = 0.85$, $PBIAS = 15.83$) períodos. El análisis del caudal simulado de 1995 a 2010 reveló que la contribución porcentual promedio de la nieve, la lluvia y el derretimiento de los glaciares al caudal del río Hunza es de aproximadamente 16.5 %, 19.4 % y 64 %, respectivamente.

Coras, (2019). El objetivo de este estudio fue utilizar la simulación hidrológica en la subcuenca de Shullcas para identificar los indicadores de eficiencia de los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía GR4J, HBV, SACSMA y SOCONT. Para el

cumplimiento del objetivo se delimitó la cuenca del punto de aforo de la estación hidrométrica de Shullcas; este proceso requirió dividir la cuenca en 12 microcuencas. Hubo acceso a datos hidrometeorológicos de registros diarios, como temperatura, precipitaciones, caudal y evapotranspiración. En la etapa de calibración se utilizaron los datos de aforo de la estación hidrométrica de Shullcas, recogidos diariamente desde enero de 2005 hasta el 30 de abril de 2012. Para la etapa de validación se utilizaron datos de la misma estación, que abarcaron el periodo de ritmo diario comprendido entre el 20 de junio de 2014 y el 31 de diciembre de 2016. Para evaluar el rendimiento del modelo se utilizaron los indicadores de eficiencia de Nash, Nash Ln, Pearson, Bias Score (BS), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Volume Bias (RVB) y Normalized Maximum Error (NPE). Dado que el modelo hidrológico HBV tenía un coeficiente de Pearson en la etapa de calibración de 0,54 y un coeficiente de Nash de 0,78, superó a los otros cuatro modelos en la simulación del caudal.

Vergaray, (2018). Cuyo objetivo era crear un modelo hidrológico que reprodujera el comportamiento de las aportaciones diarias al embalse de Torata. Llevó a cabo su investigación en Moqueguán. Para ello, desde enero de 2012 hasta abril de 2016, se utilizaron datos climáticos de la estación hidrométrica local Arondaya y de las estaciones meteorológicas locales Titijones TW4, Titijones Apacheta y Viña Blanca. Los modelos hidrológicos SACSMA, HBV y GR4J se crearon diariamente utilizando los datos climáticos.

Una vez calibrados y validados los modelos hidrológicos, se observó que el modelo SACSMA representaba mejor los caudales de la cuenca. Esto se debe a que sus indicadores Nash, RRMSE, Sesgo de volumen y Eficiencia Nash-Ln mostraron valores de 0,85, 0,53, -0,029 y 0,68, respectivamente.

Aliaga, (2017). Evaluar y cuantificar la cantidad y oportunidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Huallaga fue el objetivo de su tesis. Los ríos subsidiarios que desembocan en el río Huallaga sirvieron como límites entre las 16 subcuencas que conformaron la cuenca investigada para cumplir con este objetivo. Para la simulación

de caudales se emplearon los modelos hidrológicos SACSMA, SOCONT, HBV y GR4J; para la fase de calibración se utilizaron datos diarios de aforos a escala de salida de la estación de Santa Lorenza, comprendidos entre el 24 de julio de 2015 y el 30 de septiembre de 2016.

En consecuencia, para validar la simulación calibrada se utilizaron los datos de la estación hidrométrica de Puente Raquia, que entró en funcionamiento en 1999. El periodo de validación comenzó el 1 de marzo de 1996 y finalizó el 31 de septiembre del mismo año, con una frecuencia de salida mensual. El rendimiento de los modelos se evaluó mediante el error medio normalizado, el coeficiente de correlación de Pearson, la eficiencia de Kling-Gupta y el coeficiente de Nash-Sutcliffe. Logrando resultados positivos para los modelos HBV y GR4J. Estos modelos presentaron los mejores indicadores estadísticos de bondad de ajuste en la prueba de calibración, con un coeficiente de correlación de Pearson $> 0,88$ y un coeficiente de Nash $> 0,68$. En contraste con el modelo HBV, se seleccionó el modelo GR4J por su simplicidad y facilidad de aplicación, aunque ambos modelos son adecuados. Por último, el modelo GR4J se utilizó para obtener datos de disponibilidad de agua con una frecuencia de salida mensual desde 1996 hasta 2016. Los resultados mostraron una tasa de persistencia del 75% y un caudal medio de 26,85 m³/s y 7,04 m³/s.

Yaranga, (2017). Con el fin de evaluar los modelos hidrológicos agregados y semidistribuidos para la simulación de caudales a escala temporal diaria, llevó a cabo su investigación en la cuenca del río Mala. Los procesos tenidos en cuenta en estos modelos hidrológicos incluían la interceptación, la infiltración, la evapotranspiración, la percolación, el flujo superficial, el flujo de base y el flujo de aguas subterráneas. Se encontraron quince subcuencas aguas arriba de la estación hidrológica de La Capilla. En la fase de calibración de los modelos hidrológicos se utilizaron datos sobre las descargas medias diarias observadas en la estación de La Capilla entre el 1 de diciembre de 2002 y el 31 de diciembre de 2010. Utilizando los parámetros de

calibración, en la fase de validación se utilizaron datos sobre los vertidos medios desde el 1 de enero de 2011 hasta el 31 de marzo de 2015.

El rendimiento de los modelos se evaluó mediante los indicadores coeficiente de Nash, Nash Ln, Pearson, error cuadrático medio (RMSE), relación RSR y error volumétrico (Ev).

Los indicadores de eficiencia de Nash, Ln de Nash, Pearson, error cuadrático medio (RMSE), relación RSR y error volumétrico (Ev) de Sacramento alcanzaron valores de 0,8, 0,9, 0,9, 0,9, 0,6, 0,44 y -0,10, respectivamente, lo que lo convierte en el modelo que mejor se comportó en la simulación de caudales entre los modelos hidrológicos evaluados en el estudio.

Chávez, (2016). Desarrolló modelos lluvia-escorrentía que permiten simular caudales en diversos sitios de interés utilizando los modelos hidrológicos GR4J y SACSMA. Realizó sus investigaciones en la cuenca de los ríos Pisco y San Juan en el departamento de Ica. Los puntos de aforo Letrayoc y Conta de los ríos Pisco y San Juan, respectivamente, sirvieron como límites para las cuencas utilizadas en esta investigación.

En las cuencas de los ríos Pampas, Pisco y San Juan se ubicaron 16 estaciones con datos de precipitación diaria y ocho estaciones con datos de temperatura, de acuerdo con los datos meteorológicos recopilados en las cuencas en estudio y sus alrededores. En la fase de simulación se utilizaron datos de 1980 a 2002.

Los resultados de este estudio demuestran que el modelo GR4J no funciona en la costa sur peruana; en cambio, el modelo SACSMA produjo buenos resultados de calibración y validación. Durante la fase de validación, los parámetros estadísticos de Nash, Nash-In, Pearson, BS, RRMSE, RVB y NPE del modelo para la cuenca del río Pisco fueron 0,60, 0,33, 0,59, 0,92, 0,87, 0,28 y 0,04 respectivamente. Los valores correspondientes a los parámetros estadísticos de Nash, Nash-In, Pearson, BS, RRMSE, RVB y NPE para la cuenca del río San Juan fueron 0,59, 0,40, 0,52, 0,32, 2,08, -0,17 y 0,05.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Modelo hidrológico

De acuerdo con **Chow et al, (1994)**. Un modelo hidrológico permite la representación, comprensión y simulación de la hidrología en una cuenca hidrográfica y este modelo puede dividirse en modelos físicos y modelos matemáticos.

Beven, (1985). Indica que lo mínimo que debe tener un modelo hidrológico es su capacidad de brindar resultados aceptables en la predicción de escurrimiento a través del tiempo y eso se alcanza de manera fácil mediante el uso de modelos no distribuidos.

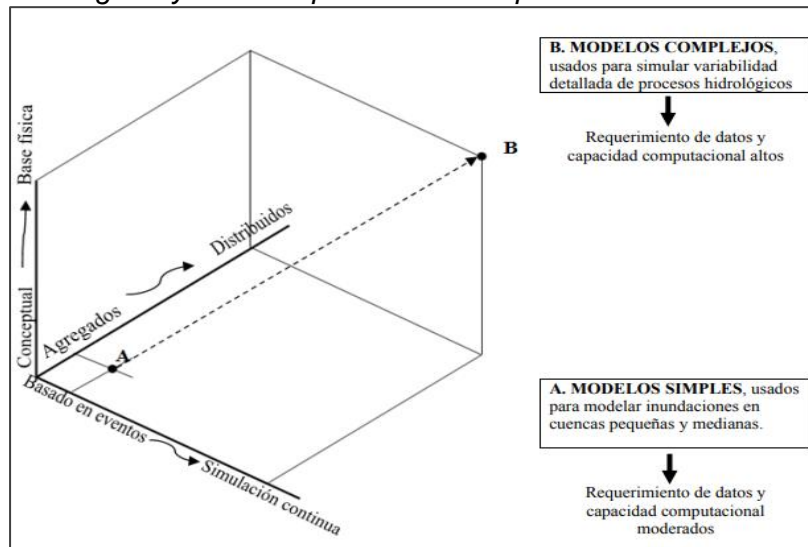
Salgado y Güitrón, (2012). Existen dos tipos de modelos hidrológicos: deterministas y estocásticos. Un modelo estocástico es aquel en el que al menos una variable se considera un dato aleatorio y las interacciones entre las variables se basan en probabilidades. Sin embargo, dado que los modelos deterministas son de naturaleza matemática, no tienen en cuenta factores aleatorios, lo que significa que las mismas entradas siempre producirán los mismos resultados en cada simulación.

Por su parte, **Cabrera, (2023)**. Clasifica de tres formas los tipos de modelamiento hidrológico:

depende de cómo se conceptualicen los procesos fundamentales: basados en procesos, conceptuales o empíricos.

Figura 1

Relación entre las características espacio - temporal de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos.

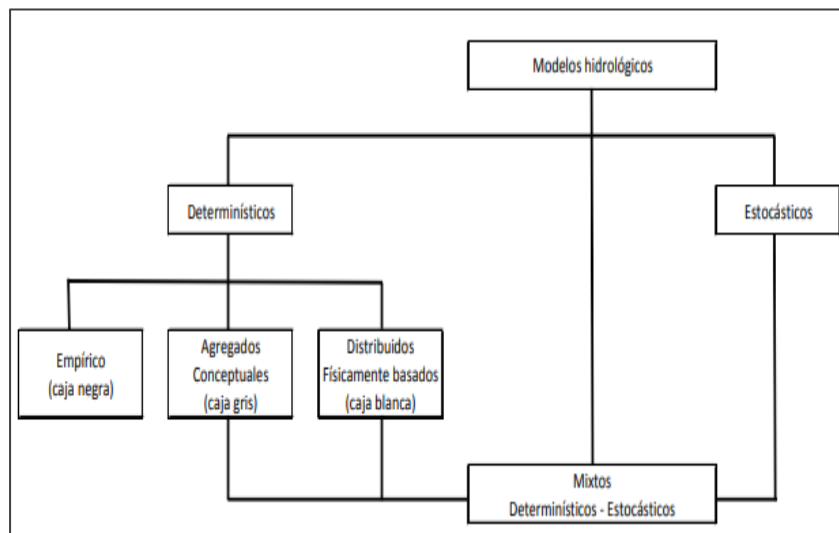


Nota: Molnar (2011).

Dependiendo de si los algoritmos son estocásticos o deterministas.

Figura 2

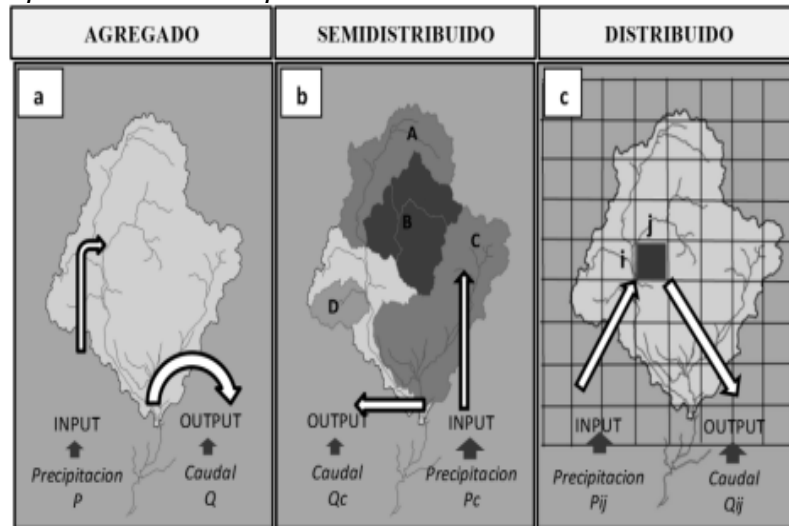
Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos.



Nota. Refsgaard y Abbott (1996).

3. Pueden dispersarse o categorizarse en función de cómo se representen espacialmente.

Figura 3 Clasificación de los modelos hidrológicos según su representatividad espacial.



Nota. Fernández et al. (1997).

3.2.1.1. Modelos empíricos. Gayathri et al. (2015). Los modelos orientados a la observación que recogen datos a partir de los datos disponibles sin tener en cuenta las propiedades y funciones del sistema hidrológico se conocen como modelos empíricos. En lugar de basarse en los procesos físicos de la cuenca, estos modelos se basan en ecuaciones matemáticas que se obtienen a partir de series temporales concurrentes de entradas y salidas.

3.2.1.2. Modelos conceptuales. Utilizando relaciones simplificadas con parámetros que no son físicamente medibles en el contexto, los modelos conceptuales representan los procesos hidrológicos más significativos a través de una base de conocimientos inicial. Este proceso comienza con la mejora de la capacidad de cálculo. Por ello, la creación de estos modelos para una cuenca concreta debe calibrarse utilizando datos que se hayan recogido en ella.

La idea de equifinalidad, o la existencia de varios valores de los parámetros del modelo con los que se obtienen medidas de ajuste comparables, es el principal inconveniente de estos modelos. En consecuencia, el modelo no puede aplicarse a nuevas cuencas sin observaciones, ni siquiera a la misma cuenca después de que se hayan producido cambios, si los valores de los parámetros no pueden definirse de forma

unívoca. Esto se debe a que los parámetros no pueden vincularse directamente a las propiedades de las cuencas. **Santos, (2016)**.

3.2.1.3. Modelos con base física. Al simular el comportamiento hidrológico de una cuenca mediante ecuaciones de continuidad clásicas y resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales utilizando métodos de diferencias finitas o de elementos finitos, estos modelos hacen uso de los conocimientos más recientes sobre el comportamiento físico de los procesos hidrológicos. El sistema físico se representa mediante un sistema de ecuaciones diferenciales que expresan el balance de masa, momento y energía porque los modelos físicos son de naturaleza definitivamente distribuida y favorecen la descripción de los fenómenos en cada una de las celdas del sistema desde la perspectiva de los parámetros, así como la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales. **Santos, (2016)**.

3.2.2. Calibración manual y automática del modelo hidrológico

De acuerdo con **Ponce, (1983)**. Encontrar los parámetros del modelo que ofrecen el mejor ajuste entre los caudales simulados y los observados se conoce como calibrar un modelo.

Pianosi et al. Muestra que hay tres procesos principales en el proceso de calibración de modelos hidrológicos:

1. Definición de los parámetros de entrada
2. Modelización para producir resultados basados en estos parámetros.
3. Análisis del desempeño de los resultados

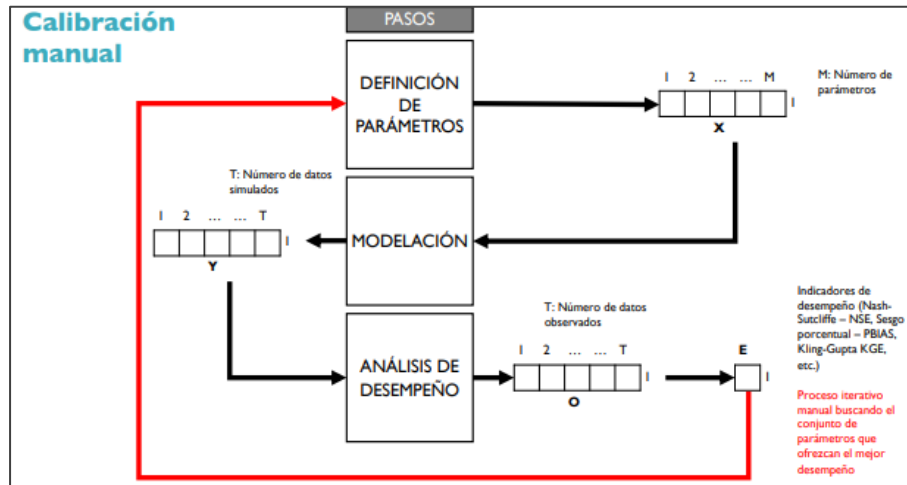
Ochoa – Tocachi et al, (2022). Indica que se ha definido un conjunto de parámetros M necesarios para la entrada del modelo en una calibración manual. La fase de calibración permite modificar estos parámetros. El modelo recibe el conjunto de parámetros y produce un conjunto de resultados de longitud T (la cantidad de datos generados o el número de meses simulados). Se compara un conjunto de datos observados con los resultados para evaluar su rendimiento; lo ideal es que cada

conjunto de datos simulados disponga de un conjunto de datos observados para su comparación.

El procedimiento se repite modificando la especificación de uno o más de los parámetros y evaluando su rendimiento cada vez si el rendimiento de los datos simulados no es el adecuado.

Figura 4

Procedimientos de calibración manual de un modelo de simulación.



Nota. Ochoa – Tocachi et al. (2020).

Calibración automática, **Ochoa – Tocachi, (2022)**. Pone de relieve que a lo largo del procedimiento de muestreo pueden darse cientos o miles de combinaciones distintas de parámetros, en lugar de una sola. El muestreo de Montecarlo o de hipercubos latinos son dos ejemplos de estrategias estadísticas formales utilizadas para este muestreo, que suponen una distribución de probabilidad para cada parámetro.

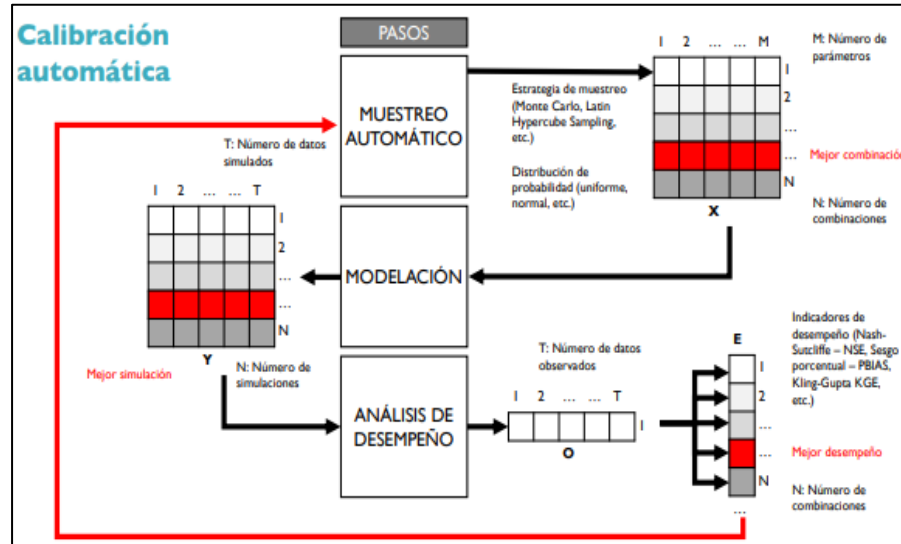
La matriz X de dimensiones $N \times M$ es el resultado final, siendo N el número de combinaciones posibles y M el número de parámetros.

Una matriz Y de dimensiones $N \times T$, donde T es el número de datos generados (que podría ser el número de caudales simulados a nivel mensual), es el resultado del proceso de modelización. La matriz X de parámetros se introduce en el modelo, que produce no sólo un conjunto de resultados, sino N conjuntos de ellos, uno por cada combinación de parámetros introducida. El rendimiento de cada línea en comparación

con el conjunto de datos observados se mide analizando esta matriz Y de resultados simulados.

Del mismo modo, se producen N resultados para cada indicador de rendimiento en lugar de un único resultado de evaluación, lo que da lugar a una matriz E de dimensiones N x L, donde L es el número de indicadores examinados.

Figura 5
Proceso de calibración automática de un modelo de simulación.



Nota. Ochoa – Tocachi et al. (2020).

3.2.3. Modelo HBV

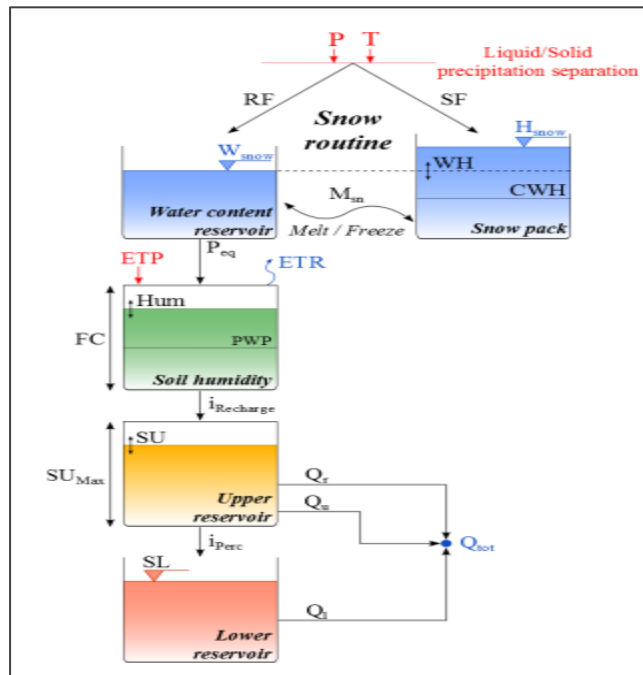
Este modelo es un ejemplo del modelo conceptual semidistribuido. **Bergström, (1976)**. Las subcuencas, subdivididas a su vez en diversas zonas de vegetación y elevación, constituyen la cuenca en su conjunto. Utiliza datos diarios y mensuales de evapotranspiración, temperatura del aire y precipitaciones. **Devia et al, (2015)**. La acumulación de nieve se calcula a partir de los datos de temperatura del aire. A continuación, se presenta la ecuación general de balance hídrico en uso:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes)$$

Donde P es la precipitación, E es la evaporación, Q es la escorrentía, SP es la capa de nieve, SM es la humedad del suelo, UZ y LZ son la zona de agua subterránea superior e inferior y los lagos representan el volumen del lago.

Ahora hay disponibles diferentes versiones del modelo y se utilizan en diferentes países con diferentes condiciones climáticas.

Figura 6
Estructura del modelo HBV.



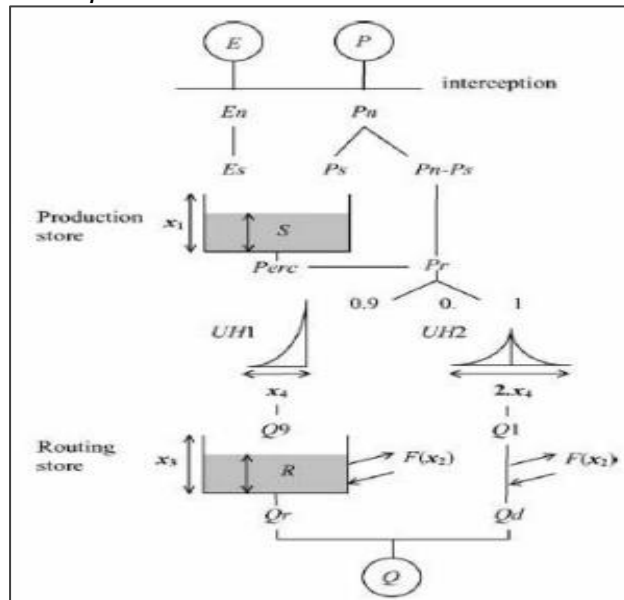
Nota. Lujano et al. (2020).

El método de grado día se utiliza para simular la acumulación y el derretimiento de la nieve. El almacenamiento real de agua se utiliza para reproducir la recarga de aguas subterráneas, la escorrentía y la evaporación real. En el nuevo modelo HBV-light se utiliza un tiempo de calentamiento para garantizar que las variables de estado se ajustan a sus valores adecuados en función de los valores paramétricos y los datos meteorológicos. **Devia et al, (2015).**

3.2.4. Modelo GR4J

De acuerdo con **Perrin et al, (2003)**. El modelo GR4J, que tiene cuatro parámetros (véase la figura 7) y una resolución diaria, fue creado en Francia y es del tipo lluvia-escorrentía agregada. Este modelo permite simular los caudales diarios en una cuenca hidrológica, predecir las crecidas y los estiajes, reproducir el funcionamiento de la cuenca e interpolar y extrapolar las condiciones climáticas de la misma.

Figura 7
 Descripción modelo GR4J.



Nota. Perrin et al. (2003).

La capacidad del depósito de producción (X_1), que depende del tipo de suelo de la cuenca, es la cantidad de precipitación que puede almacenarse en la superficie del suelo. La percolación y la evapotranspiración se producen en este suelo, y su porosidad de almacenamiento puede aumentar la capacidad de almacenamiento de la producción. Las aguas subterráneas determinan el coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (X_2). El agua entra en el acuífero cuando tiene un valor negativo y sale cuando tiene un valor positivo. La cantidad de agua que puede almacenarse en los poros del suelo se conoce como capacidad de embalse de laminación (X_3). El tipo y el contenido de humedad del suelo determinan su valor. El punto más alto de las ordenadas del hidrograma de crecida es el tiempo base de los hidrogramas unitarios (X_4). La ordenada de este hidrograma está formada por la esorrentía, siendo el 10% del caudal un flujo rápido que fluye sobre la superficie del suelo y el 90% un flujo lento que se filtra en el suelo. **Aliaga, (2017).**

Figura 8

El rendimiento de los modelos hidrológicos se compara utilizando parámetros de rendimiento.

Estadístico	Ecuación	Valor Optimo
Desviación estándar (DE) ²	$DE_{Q_{sim}} = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \overline{Q_{sim}})^2 \right)$	0
Coefficiente de correlación de Pearson (CC)	$CC = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \overline{Q_{sim}})(Q_{ref,t} - \overline{Q_{ref}})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \overline{Q_{sim}})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \overline{Q_{ref}})^2}}$	1
Bias Score (BS)	$BS = 1 - \left \max \left(\frac{Q_{sim}}{Q_{ref}} \right) - 1 \right $	1
Coefficiente de Nash (Nash)	$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \overline{Q_{ref}})^2}$	1
Coefficiente de Nash para valores Logarítmicos (Nash-in)	$Nash - ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\overline{Q_{ref}}))^2}$	1
Raíz del Error Cuadrático Medio Relativo (RRMSE)	$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}}{n \cdot \overline{Q_{ref}}}$	0
Raíz del Error Cuadrático Medio Centrado (RMSD)	$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_i}^{t_f} [(Q_{sim,t} - \overline{Q_{sim}}) - (Q_{ref,t} - \overline{Q_{ref}})]^2}$	0

Nota. Elaboración propia.

3.3. Definiciones de términos

1. **Precipitación.** - Es el agua que proviene de la atmósfera y se deposita en la superficie terrestre ya sea en estado líquida o sólido **Mediero, (2021)**.

2. **Evapotranspiración potencial.** - **Allen et al. (2006)**. Definen a la evapotranspiración como la pérdida de agua en donde suceden procesos separados, por un lado, está el agua que por evaporación se pierde de la superficie del suelo y en el otro mediante la transpiración del cultivo.

3. **Ciclo hidrológico.** - La evaporación del suelo, del mar o de las aguas continentales, la condensación de las nubes, las precipitaciones, la acumulación en el suelo o en las masas de agua y la reevaporación son las etapas por las que pasa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y viceversa. **Ordoñez, (2011)**.

4. Esguerrimiento. - De la Lanza **et al, (1999)**. Lo definen como parte la precipitación que fluye por gravedad en la superficie terrestre o en su interior del mismo dando lugar a una corriente de agua.

5. Infiltración. - Este fenómeno se produce cuando el agua, impulsada por la gravedad, percola en el suelo tanto vertical como horizontalmente tras el riego o las precipitaciones. **Valverde, (2007)**.

6. Cuenca hidrográfrica. - Toda zona terrestre que influye en el flujo de agua de un río o arroyo se denomina cuenca hidrográfrica. La zona terrestre de la que proceden las aguas de un río, arroyo, lago, laguna, estanque, humedal, estuario, embalse, acuífero, manantial o pantano se denomina a veces cuenca hidrográfrica. **Servicio Forestal de los Estados Unidos, (2023)**.

7. Pluviómetro. - Las precipitaciones pueden medirse en un recipiente abierto con lados verticales, pero los datos no son comparables a menos que tengan el mismo tamaño, forma y exposición. Esto se debe a los efectos del viento y las salpicaduras. **Ordoñez, (2011)**.

8. Modelo Hidrológico. - Representación matemática del ciclo hidrológico, utilizada para imitar el comportamiento del agua en la cuenca, como la escorrentía, infiltración y almacenamiento.

9. GR4J (Génie Rural a 4 parametres Journalier). - Modelo hidrológico conceptual de tipo lluvia-escorrentía, desarrollado en Francia. Utiliza cuatro parámetros y opera con datos diarios para estimar caudales.

10. HVB (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning). - Modelo hidrológico conceptual de origen sueco, diseñado para simular el balance hídrico en una cuenca en función de la evapotranspiración, la temperatura y las precipitaciones.

11. Balance Hídrico. – Relación entre las entradas (precipitación) salidas (escorrentía, evapotranspiración) y almacenamiento de agua en una cuenca.

12. Caudal. – Cantidad de agua que fluye a través de la sección transversal de un río o canal en un periodo de tiempo determinado, normalmente medida en m³/s.

13. Simulación Hidrológica. – el método de emplear modelos informáticos para producir matemáticamente el comportamiento del ciclo hidrológico de una cuenca.

14. Datos Hidrometeorológicos. – Información cuantitativa sobre variables como precipitación, temperatura, caudal, humedad y radiación solar, empleada en estudios hidrológicos.

15. Parámetros del Modelo. – Variables internas de un modelo hidrológico que controlan su comportamiento y deben ser calibradas para representar adecuadamente una cuenca.

16. Calibración del Modelo. – procedimiento que consiste en modificar los parámetros de un modelo hidrológico para asegurarse de que sus resultados se corresponden con los datos reales.

17. Validación del Modelo. – Etapa en la que se verifica la capacidad predictiva del modelo usando datos distintos a los empleados en la calibración.

IV. Metodología.

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

El objetivo es que, al centrarse en la resolución de problemas dentro de un contexto, sea comparable a la investigación aplicada. **Suárez, (2023)**. en este caso, la cuenca del río Pachachaca.

4.1.2. Nivel de investigación

Dado que se utilizarán dos modelos hidrológicos, GR4J y HBV, para predecir caudales en la cuenca del río Pachachaca, el nivel o alcance de este estudio se alinea con el nivel o alcance descriptivo.

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Ámbito temporal

Este estudio se realizó en la cuenca del río Pachachaca en agosto y septiembre de 2024.

4.2.2. Ámbito espacial

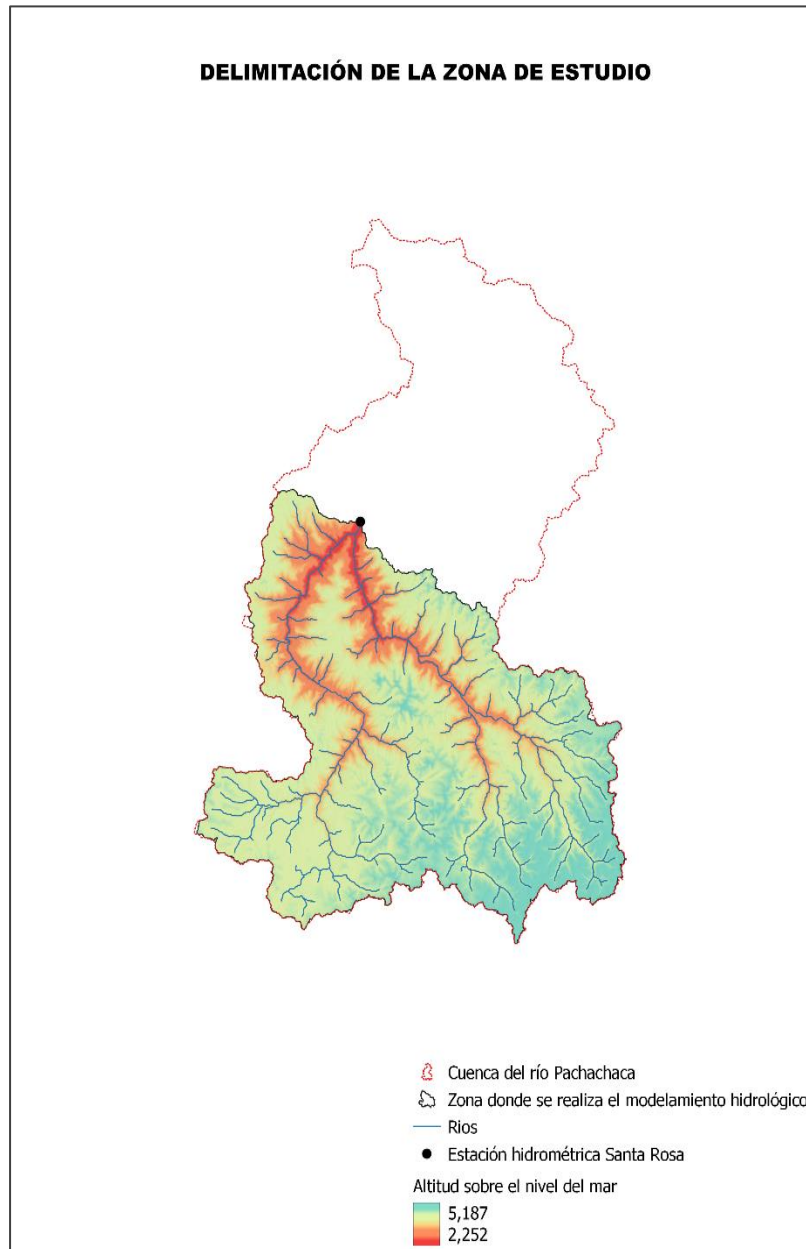
En la cuenca del río Pachachaca, situada geográficamente entre las latitudes 13° 18' y 14° 16' Sur y las longitudes 72° 44' y 73° 30' Oeste, provincia de Abancay, departamento de Apurímac, es donde se realizó este estudio.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población en este caso es la cuenca del río Pachachaca en su conjunto, que incluye las microcuencas.

Los atributos físicos de la cuenca incluyen su área de drenaje, suelo, pendientes y tipos de suelo, así como las estaciones meteorológicas situadas en su interior.

Figura 9*Delimitación del área de estudio.*

Nota. Elaboración propia.

El ámbito de estudio donde se realizó el modelamiento hidrológico presenta las siguientes características morfológicas:

- Área de la cuenca: 4951.50 km².
- Perímetro de la cuenca: 580.33 km.
- Ancho de la cuenca: 94.99 km.
- Longitud de la cuenca: 91.81 km
- Longitud del cauce principal: 63.02 km.

- Cota mínima: 2252 metros.
- Cota máxima: 5187 metros.
- Pendiente media de la cuenca: 19.01 grados.
- Coeficiente de Gravelius: 2.33.
- Rectángulo equivalente:
- Longitud: 271.96 km.
- Ancho: 18.21 km.

4.3.2. Muestra

- Datos utilizados en la modelación, que incluyen:
- Registro diario de precipitación, temperatura y caudales del periodo (2019 – 2023).
- Datos de calibración: 60% del periodo de estudio (2019 - 2021).
- Detalles sobre estaciones hidrometeorológicas concretas de la cuenca.

4.4. Instrumentos

Las técnicas e instrumentos utilizados para el desarrollado de la investigación se aplicaron las siguientes técnicas:

- Análisis de datos secundarios, recopilación de información hidrometeorológica de fuentes oficiales.
- Simulación computacional, implementando los modelos hidrológicos GR4J y HBV en RS MINERVE 2.9.
- Optimización automática de parámetros, utilizando el método SCE – UA para calibrar los modelos.
- Evaluación estadística de desempeño hidrológico, aplicando indicadores como coeficiente de Nash – Sutcliffe, coeficiente de Pearson el error cuadrático medio relativo.
- Comparación de modelos hidrológicos, analizando precisión del modelo GR4J y HBV en la estimación de caudales.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Software SIG
- RS MINERVE 2.9
- Datos hidrometeorológicos.
- QGIS 3.38.0 la delimitación de la zona de estudio, tal como se presenta en la figura 8.

4.5. Procedimientos

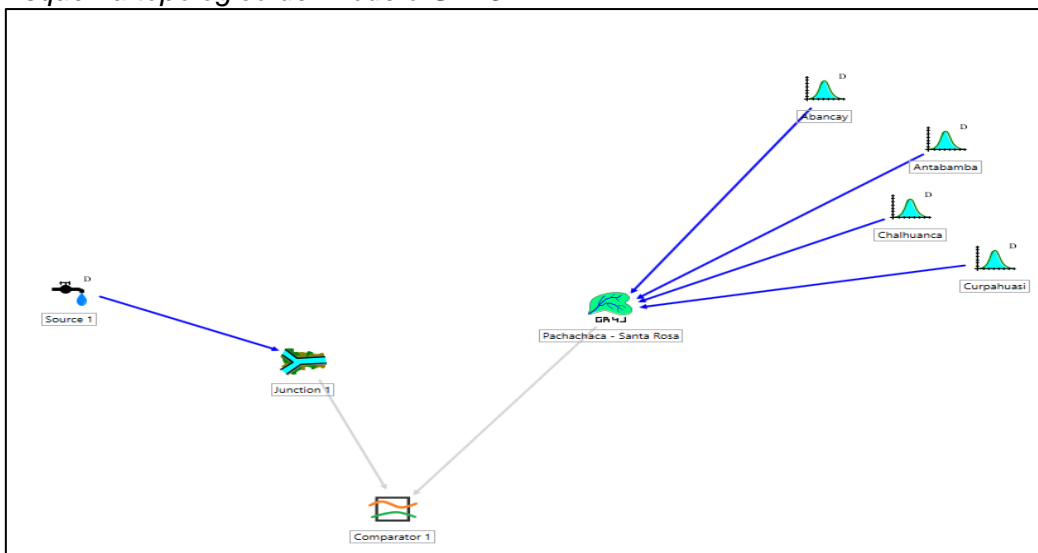
1. Software para la modelación hidrológica

La modelación hidrológica fue a paso diario. Para la calibración se usó el 60% de datos y en la validación el 40% restante de toda la información hidroclimática utilizada como insumo de entrada de estos modelos.

La construcción topológica del modelo hidrológico GR4J estuvo de acuerdo al siguiente esquema:

Figura 10

Esquema topológico del modelo GR4J.

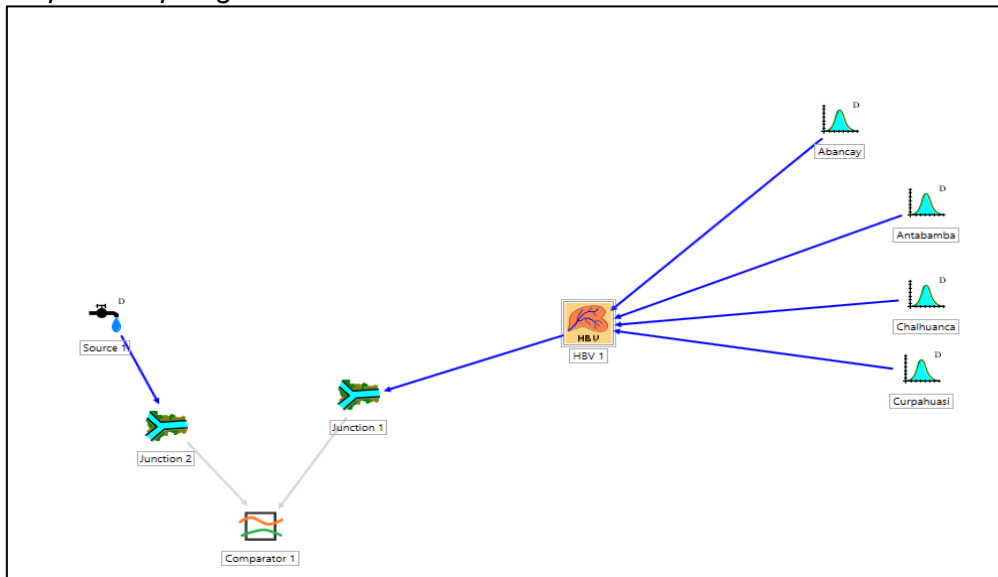


Nota. Elaboración propia.

Mientras que el modelo hidrológico HBV tuvo el siguiente esquema topológico:

Figura 11

Esquema topológico del modelo HBV.



Nota. Elaboración propia.

1. Software para el cálculo de la evapotranspiración

Para estimar este parámetro se recurrió al uso del software R Project, mediante líneas de código se desarrolló el método de Hargreaves – Samani cuya ecuación es la siguiente.

$$Et_0 = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) *$$

Donde:

Et₀. la evapotranspiración diaria (mm/día)

T_{med}. la temperatura promedio diaria (°C).

Rs. la radiación solar incidente (mm/día)

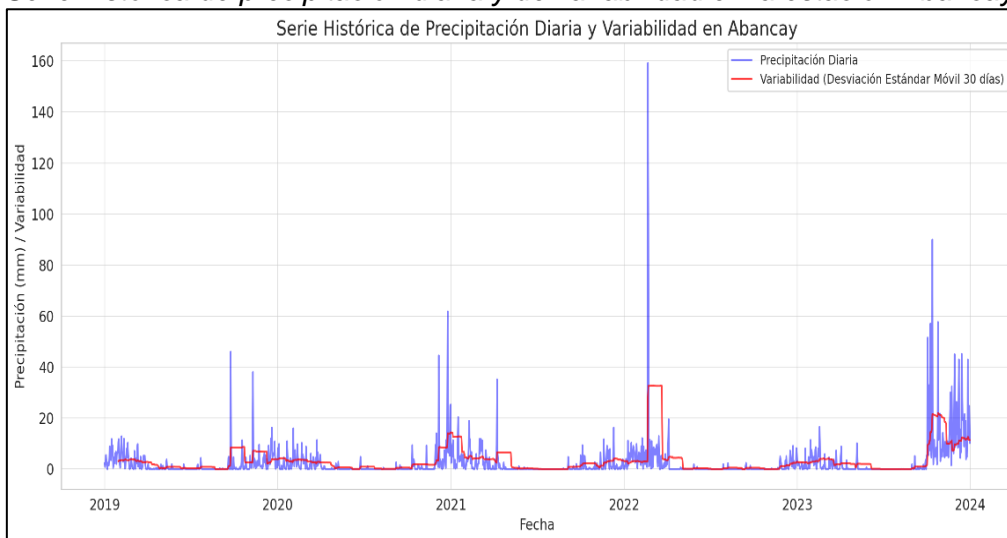
Análisis exploratorio de datos: para entender la distribución de los datos de precipitación y caudales en la cuenca y detectar posibles valores atípicos o faltantes.

Figura 11, en la serie de tiempo de precipitación diaria en la estación Abancay se muestra en azul, mientras que la variabilidad, representada por la desviación estándar móvil de 30 días, se muestra en rojo. Los períodos con mayor variabilidad en la precipitación, indicados por picos en la línea roja, resaltan los momentos en los que la cantidad de lluvia diaria cambió significativamente dentro del período de un mes.

Estos picos coinciden con temporadas de lluvias intensas o transiciones entre estaciones secas (suele encontrarse entre mayo a setiembre, siendo junio y julio las más secas) y húmedas (desde octubre hasta abril, siendo enero y febrero los más húmedos).

Figura 12

Serie histórica de precipitación diaria y de variabilidad en la estación Abancay.

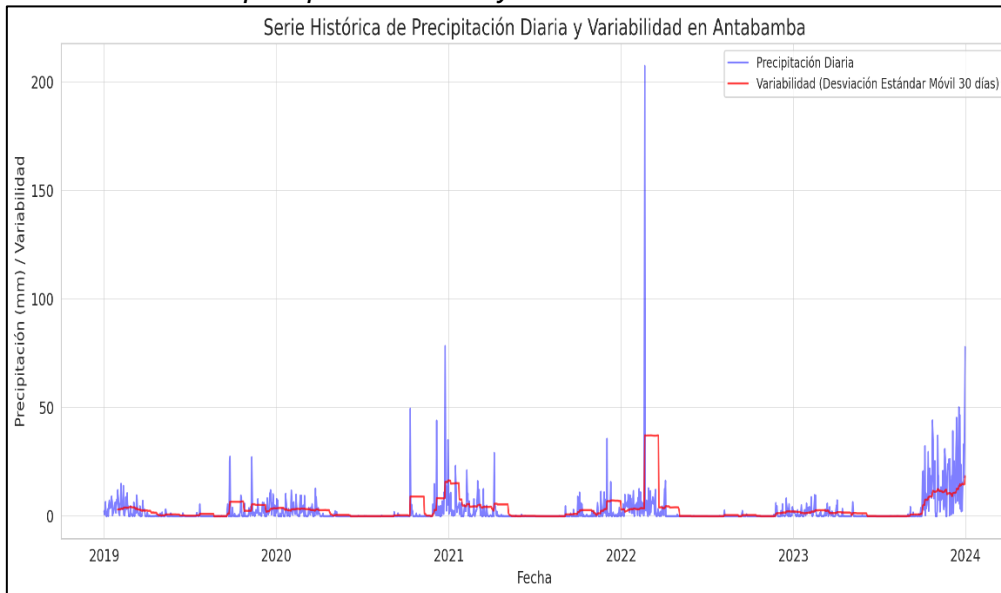


Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, la figura 12 muestra la serie histórica de precipitación diaria y su variabilidad en la estación Antabamba. De igual forma a lo observado para la estación Abancay, la línea azul representa la precipitación diaria, mientras que la línea roja indica la variabilidad, medida como la desviación estándar móvil de 30 días.

Figura 13

Serie Histórica de precipitación diaria y de variabilidad en la estación Antabamba.



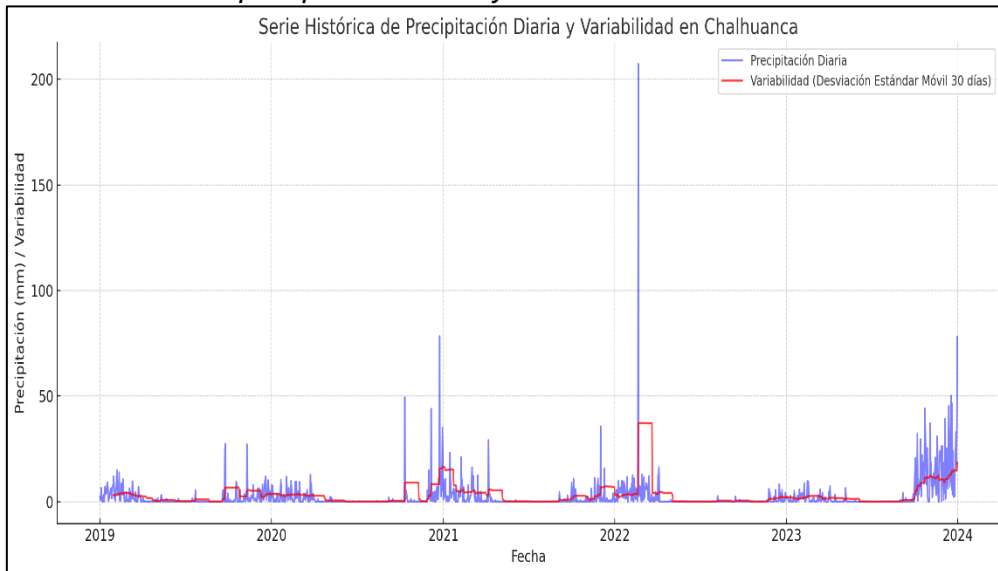
Nota. Elaboración propia.

Los períodos con mayor variabilidad, destacados por picos en la línea roja, sugieren momentos de cambios significativos en la cantidad de precipitación diaria, lo que corresponde a las transiciones entre estaciones secas, desde el mes de mayo hasta setiembre, y húmedas que normalmente se ubican en los meses de octubre hasta abril o a eventos de lluvias intensas. Estos patrones son indicativos de la dinámica estacional y de la influencia de factores climáticos locales sobre el régimen de precipitaciones en Antabamba.

De igual forma, la figura 13 muestra la serie histórica de precipitación diaria y su variabilidad en la estación Chalhuanca, con la precipitación diaria representada en azul y la variabilidad (desviación estándar móvil de 30 días) en rojo. El análisis es similar que, en los conjuntos de datos anteriores, los períodos de mayor variabilidad son indicados por picos en la línea roja, destacando momentos de cambios significativos en la cantidad de precipitación diaria.

Figura 14

Serie histórica de precipitación diaria y de variabilidad en la estación Chalhuanca.



Nota. Elaboración propia.

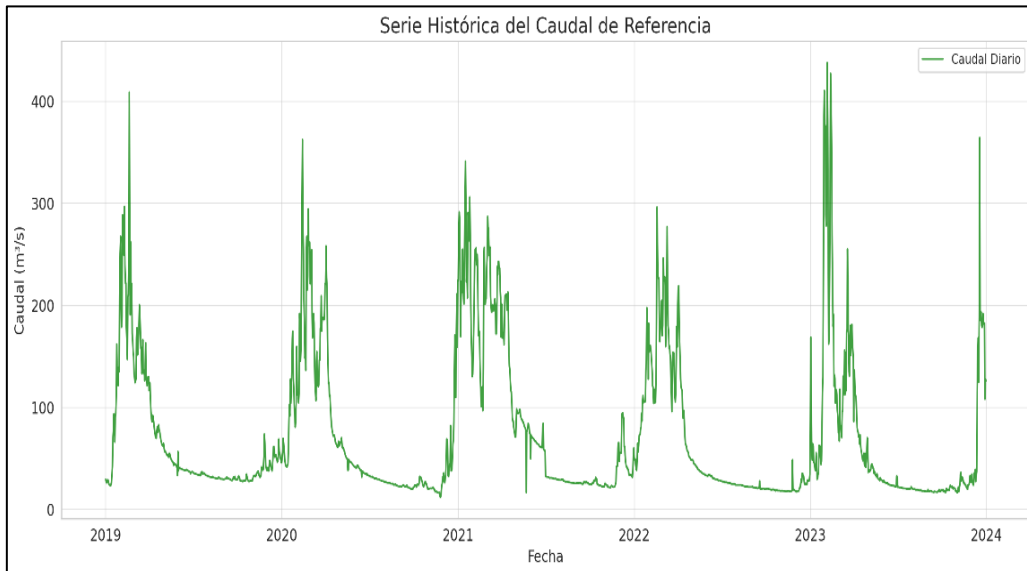
Estos corresponden a transiciones entre estaciones secas, que empiezan en el mes de mayo y termina en setiembre, y húmedas, que inician en octubre y terminan en abril, o a eventos de lluvias intensas que tienen lugar en los meses de noviembre hasta marzo, subrayando la presencia de patrones estacionales y la influencia de factores climáticos locales en el régimen de precipitaciones de Chalhuanca.

Finalmente se advierte que en todas las series de precipitación que corresponden a cada estación no se evidenció valores ausentes.

Respecto a la figura 14, se evidencia patrones que sugieren fluctuaciones estacionales en el caudal. Esto suele ser frecuente en ríos donde el caudal varía con las estaciones, tal como sucede en las cuencas andinas, incrementándose en las temporadas de lluvia producto de la escorrentía y disminuyendo en períodos secos.

Figura 15

Serie histórica del caudal de referencia.



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, se puede advertir que la serie es estacionaria, esto implicaría que las propiedades estadísticas de la serie (como la media y la varianza) son constantes a lo largo del tiempo.

Además, se observa que no existe valores nulos en el conjunto de datos de caudales de referencia (observados).

Calibración y validación: Para evaluar la capacidad de los modelos hidrológicos de replicar los caudales observados en la cuenca se emplearon las siguientes métricas de eficiencia: RRMSE, Coeficiente de Correlación de Pearson, Nash-Sutcliffe, y Nash-Sutcliffe In.

El valor ideal de estos indicadores se muestra en la siguiente tabla:

Tabla Valor ideal de los indicadores estadísticos empleados en la medición del rendimiento de los modelos hidrológicos

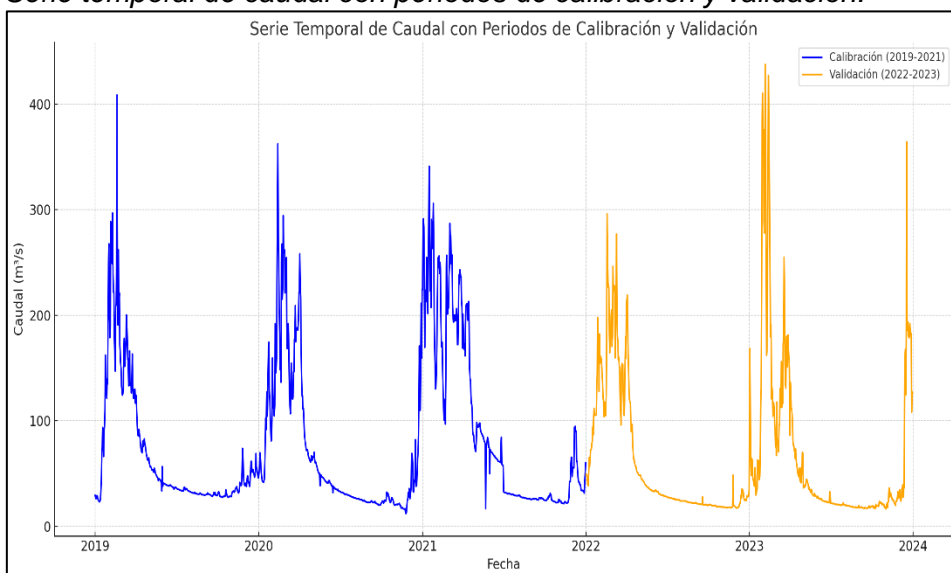
Indicador estadístico	Rango de evaluación	Valor ideal
Nash-Sutcliffe	$-\infty$ a 1	1
Nash-Sutcliffe In	$-\infty$ a 1	1
Pearson Correlation Coeff	-1 a 1	1
RRMSE	0 a $+\infty$	0

Nota. Adaptado de Calixto (2021).

Los datos del caudal de referencia se dividieron en dos etapas: calibración (01/01/2019 al 31/12/2021) y validación (01/01/2022 al (31/12/2023)

Figura 16

Serie temporal de caudal con periodos de calibración y validación.



Nota. Elaboración propia.

4.6. Análisis estadístico de datos

Se realizaron los siguientes procedimientos estadísticos en esta investigación:

Los datos se ingresaron al modelo hidrológico GR4J y HBV donde los resultados se muestran en evapotranspiración, precipitación (T máxima – T mínima), caudal registrado.

4.7. Implementación y evaluación del modelo hidrológico GR4J

La creación topológica de la cuenca del río Pachachaca sirvió de base para la aplicación y evaluación del modelo hidrológico GR4J. El punto de aforo y la delimitación de la cuenca fueron georreferenciados utilizando el software QGIS Desktop 3.28.13. Se utilizaron los siguientes componentes para sistematizar el sistema: V-Station

- GR4J
- Comparator
- Junction
- Source

Se utilizó el método SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-Universidad de Arizona) para calibrar automáticamente. El periodo de calibración fue desde el 01/01/2019 hasta el 31/12/2021, que corresponde al 60% de toda la información. Este

método de calibración ejecutó 1332 búsquedas automáticas para una calibración eficiente, no obstante, los resultados no fueron alentadores.

Los indicadores estadísticos producto del proceso de calibración se presentan en la tabla 3; de estos indicadores podemos advertir que los valores están por debajo del valor ideal, lo que indica un rendimiento ineficiente del modelo GR4J durante la fase de calibración.

Tabla 2

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de calibración del modelo GR4J.

Indicadores estadísticos del modelo GR4J	Calibración
	Periodo: 01/01/2019 al 31/12/2021
Nash-Sutcliffe	-6.84
Nash-Sutcliffe ln	-20.69
Pearson Correlation Coeff	0.27
RRMSE	2.59

Nota. Adaptado de Calixto (2021).

Los valores típicos aceptables para Nash-Sutcliffe están por encima de 0.5 para considerarse aceptables en mayoría de los casos, y valores superiores a 0.7 - 0.8 son considerados buenos y un valor de 1 representa una correspondencia perfecta, pero, un Nash-Sutcliffe negativo, como el -6.84 mostrado, indica que el modelo es inadecuado. De igual modo, se espera el valor de Pearson Correlation Coefficient para modelos hidrológicos este cercano a 1. Un valor de 0.27 es bajo y sugiere que el modelo GR4J no está capturando la variabilidad de los datos observados de manera efectiva.

En el caso del RRMSE, es deseable que sus valores sean menores al 0.5, sin embargo, valores hasta 0.6 o 0.7 resultan aceptables. Un valor de 2.59 indica una gran discrepancia entre las predicciones y los valores observados.

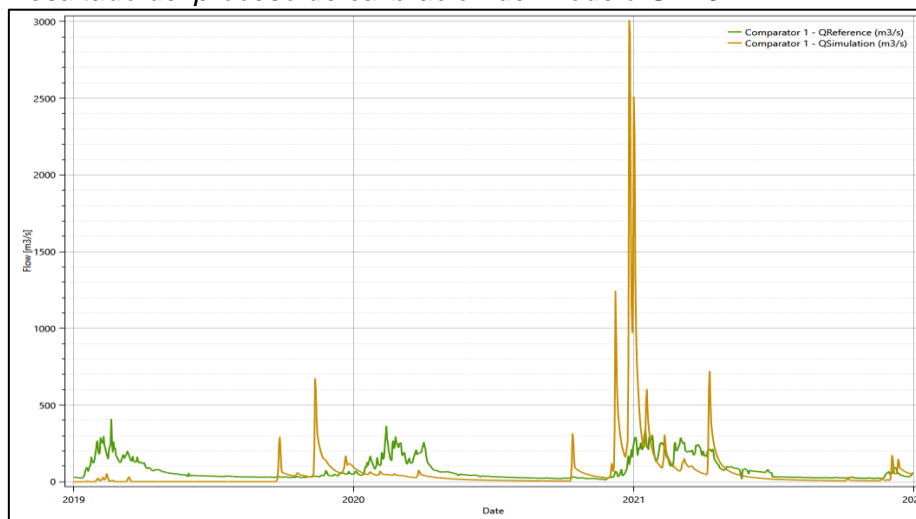
Esto implica que los caudales simulados por modelo hidrológico no se ajustan adecuadamente a los caudales observados. Dicho de otro modo, este resultado podría indicar que el modelo no está representando adecuadamente el comportamiento observado del sistema hidrológico.

En la figura 16, la línea de simulación (línea naranja) parece seguir la tendencia general de la línea de referencia (línea verde) que corresponde al caudal observado,

aunque existen diferencias notables. En varios puntos, los picos de la simulación no coinciden completamente con los de la referencia, lo que indica que el modelo de simulación puede no estar capturando con precisión todos los eventos. El modelo tiende a sobreestimar algunos eventos de flujo alto. Se evidencia que hay períodos donde el modelo subestima el caudal en comparación con los datos observados. Esto puede ser el resultado de una respuesta subestimada del modelo a las entradas hidrológicas o a la falta de captura de ciertos procesos dentro del sistema.

Figura 17

Resultado del proceso de calibración del modelo GR4J.



Nota. Elaboración propia.

A pesar de los resultados insatisfactorios de la etapa de calibración, seguimos adelante y validamos el modelo utilizando el 40% restante de los datos del 1 de enero de 2022 al 31 de diciembre de 2023, para evaluar la capacidad del modelo de reproducir el comportamiento del sistema hidrológico en condiciones no utilizadas en la calibración.

La validación ayuda a determinar si el modelo puede generalizarse a nuevas situaciones y ofrece una evaluación imparcial del rendimiento del modelo.

La tabla 4 muestra los indicadores estadísticos de rendimiento del modelo hidrológico durante la fase de validación. En esta etapa se muestra un valor de -325,75 para Nash-Sutcliffe, lo que indica que el modelo es insuficiente. En el caso del Pearson Correlation Coeff, el valor reportado es de 0.14 lo que sugiere que el modelo no está capturando la variabilidad específica de los datos observados. El valor del RRMSE es

de 20.36 nos señala que existen una gran diferencia entre las predicciones y los valores simulados. Esto supone a entender que el modelo hidrológico no está reproduciendo adecuadamente el comportamiento observado del sistema hidrológico en condiciones no utilizadas en la calibración.

Tabla 3

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de validación del modelo GR4J.

Indicadores estadísticos del modelo GR4J	Validación
	Periodo: 01/01/2022 al 31/12/2023
Nash-Sutcliffe	-325.75
Nash-Sutcliffe ln	-13.56
Pearson Correlation Coeff	0.14
RRMSE	20.36

Nota. Adaptado de Calixto (2021).

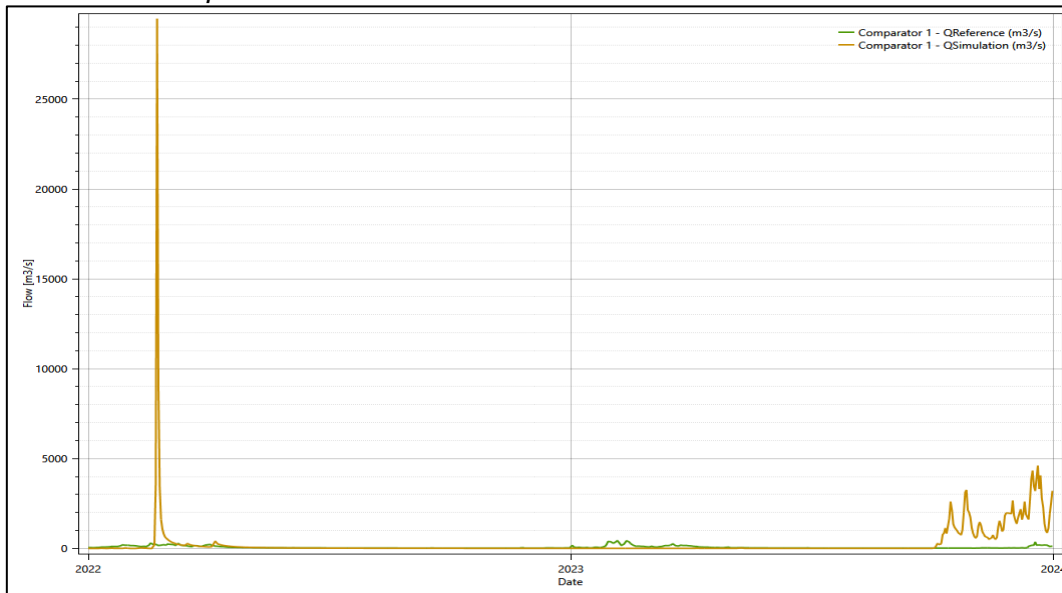
En síntesis, aunque el modelo GR4J tiene la facultad de producir valores semejantes a los observados en términos generales, no está capturando las fluctuaciones o patrones detallados de los datos reales.

Visualmente se aprecia, en la figura 17, que la línea de simulación (línea naranja) pareciera no seguir la tendencia general de referencia (línea verde) que representa el valor del caudal observado.

En varios puntos, los picos de simulación no coinciden completamente con los valores de referencia. Esta situación nos indica que el modelo no captura con precisión todos los eventos, además se observa que hay periodos donde el modelo tienen a sobreestimar algunos eventos de flujo alto, la misma situación reportada en la etapa de calibración.

Figura 18

Resultados del proceso de validación del modelo GR4J.



Nota. Elaboración propia.

Por último, la Tabla 5 muestra los parámetros calibrados del modelo utilizando el módulo de calibración del software RS MINERVE. Para completar este trabajo se utilizaron los caudales medios diarios observados en la cuenca investigada.

Tabla 4

Parámetros calibrados del modelo GR4J.

Nombre	Unidad	Descripción	Valor calibrado
A	m ²	Área de la cuenca en estudio.	4950094712
X1	Mm	Capacidad de almacenamiento	1.0016952
X2	m/s	Coeficiente de intercambio de agua	-1E-07
X3	Mm	Capacidad del almacenamiento del enrutamiento	483.8362423
X4	D	UH tiempo base	2.8964946

Nota. Adaptado de Calixto (2021).

4.8. Implementación y evaluación del modelo hidrológico HBV

En la implementación y evaluación del modelo hidrológico HBV se tuvo en cuenta la creación topológica basada en los siguientes componentes del sistema, que se apoyó en el software QGIS Desktop 3.28.13 para la georreferenciación de los puntos de aforo y la delimitación de las cuencas hidrográficas:

- V-Station
- HBV
- Comparator

- Junction
- Source

Respecto a la calibración, se hizo uso del método SCE – UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) con el registro de datos comprendidos entre el 01/01/2019 hasta el 31/12/2021, que representan el 60% de los datos preparados para el modelamiento. Este método de calibración realizó 4753 búsquedas automáticas para llevar a cabo una calibración eficiente.

La Tabla 6 muestra los indicadores estadísticos utilizados durante el proceso de calibración. Sobre la base de estos indicadores, puede demostrarse que el modelo hidrológico HBV funcionó eficazmente durante la fase de calibración, ya que los valores se encontraban dentro del intervalo ideal. El modelo parece suficiente ya que el valor de Nash-Sutcliffe obtenido es superior a 0,5, lo cual es aceptable. Se obtiene una puntuación de 0,79 para el coeficiente de correlación de Pearson, lo que indica que el modelo HBV capta eficazmente la variabilidad de los datos.

Hay poca diferencia entre los valores previstos y los reales, como indica el valor aceptable de RRMSE de 0,59. Esto sugiere que la simulación de caudales del modelo hidrológico se adapta adecuadamente a los caudales observados durante la fase de calibración.

Esto sugiere que la simulación de los caudales del modelo hidrológico se adapta adecuadamente a los caudales observados durante la fase de calibración.

Tabla 5

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de calibración del modelo HBV.

Indicadores estadísticos del modelo HBV	Calibración
	Periodo: 01/01/2019 al 31/12/2021
Nash-Sutcliffe	0.59
Nash-Sutcliffe ln	-0.73
Pearson Correlation Coeff	0.79
RRMSE	0.59

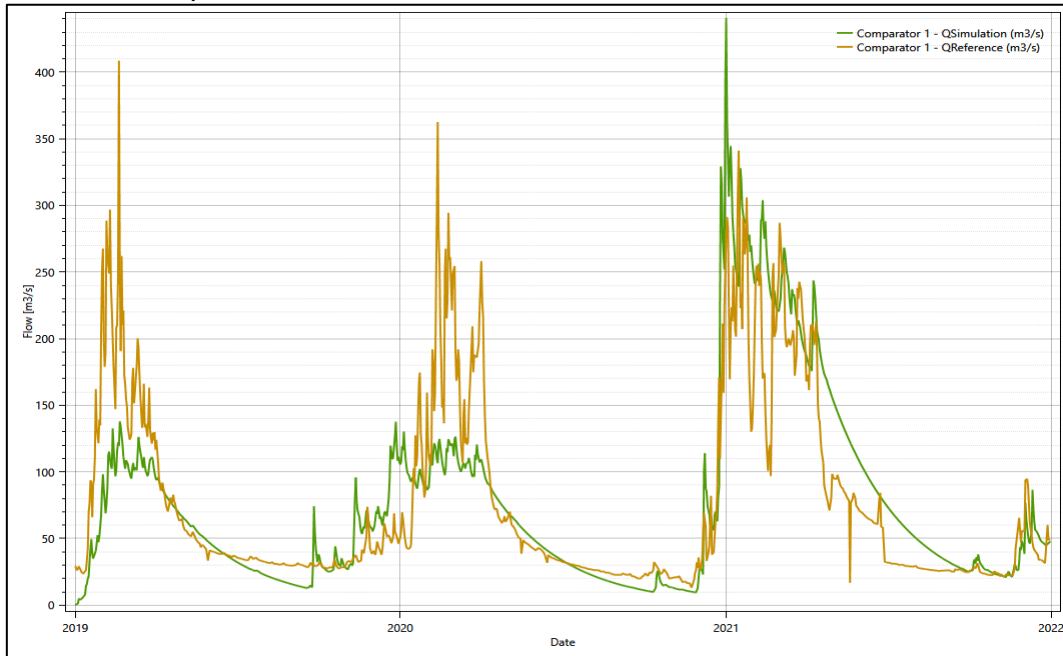
Nota. Adaptado de Calixto (2021).

En la figura 18, la línea de simulación (línea naranja) parece seguir la tendencia general de la línea de referencia (línea verde) que corresponde al caudal observado. Se

aprecia que, en varios puntos, los picos de simulación coinciden suavemente con los de referencia lo que implica que este modelo de simulación está capturando con precisión la mayoría de los eventos. Sin embargo, hay períodos, especialmente en torno a los picos más altos, donde la simulación no coincide exactamente con los datos de referencia.

Figura 19

Resultado del proceso de calibración del modelo HBV.



Nota. Elaboración propia.

La capacidad del modelo HBV para replicar el comportamiento del sistema hidrológico en situaciones de no calibración se evaluó validándolo con el 40% restante de datos del 1 de enero de 2022 al 31 de diciembre de 2023.

En la tabla 7 muestra los indicadores estadísticos del rendimiento de los modelos hidrológicos en la fase de validación. La validación ofrece una evaluación imparcial del rendimiento del modelo y ayuda a determinar si el modelo puede generalizarse a nuevas circunstancias.

Tabla 6

Indicadores estadísticos de desempeño correspondiente a la etapa de validación del modelo HBV.

Indicadores estadísticos del modelo HBV	Validación Periodo: 01/01/2022 al 31/12/2023
Nash-Sutcliffe	-28.60
Nash-Sutcliffe ln	-5.50
Pearson Correlation Coeff	0.07
RRMSE	6.48

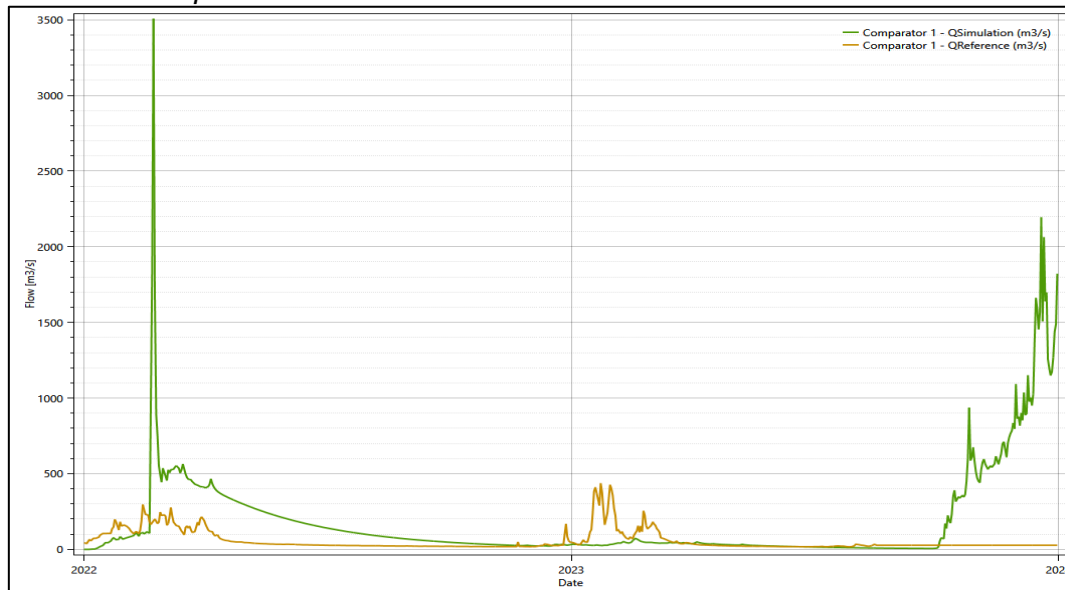
Nota. Adaptado de Calixto (2021).

Para la validación se observa que Nash presenta un valor de -28.60 lo que indica que este modelo no es adecuado. Por otra parte, el Pearson Correlation Coeff, tiene un valor de 0.07 lo que sugiere que el modelo no está capturando la variabilidad específica de los datos observados.

Respecto al RRMSE, este reporta un valor de 6.48 lo que nos indica que hay una gran diferencia entre las predicciones y los valores simulados. Esto supone a entender que el modelo hidrológico no está reproduciendo adecuadamente el comportamiento observado del sistema hidrológico en condiciones diferentes al de la calibración y puede ser un problema si se pretende utilizar el modelo para hacer predicciones.

Figura 20

Resultado del proceso de validación del modelo HBV.



Nota. Elaboración propia.

La figura 19, nos muestra que la línea de simulación (línea verde) no sigue la tendencia general de referencia (línea naranja) que representa el valor del caudal observado.

En la mayoría de los puntos, los picos de simulación no coinciden completamente con los valores de referencia. Esto implica que el modelo no captura con precisión todos los eventos, también se observa que en muchos de los periodos el modelo tiene a sobreestimar algunos eventos de flujo alto.

Por último, tras el procedimiento de calibración, el cuadro 8 muestra los parámetros del modelo HBV.

Tabla 7
Parámetros calibrados del modelo HBV.

Nombre	Unidad	Descripción	Valor calibrado
A	m ²	Área de la cuenca en estudio.	4950094712
CFMax	mm/°C/d	Factor de fusión	10.8228362
CFR	-	Factor de recongelación	0.3051609
CWH	-	Contenido de agua relativo crítico de la capa de nieve	0.1036885
TT	°C	Umbral de temperatura de lluvia/nieve	2.6778277
TTInt	°C	Intervalo de temperatura para mezclas lluvia/nieve	1.5043173
TTSM	°C	Umbral de temperatura para derretimiento de nieve	0.6825803
Beta	-	Parámetro de modelo (Coeficiente de forma)	1.0000598
FC	Mm	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	649.9464654
PWP	-	Punto de marchitez permanente del suelo	0.5666529
SUMax	Mm	Umbral de nivel de agua del reservorio alto	99.9648687
Kr	1/d	Coeficiente de almacenamiento del flujo cercano	0.1323167
Ku	1/d	Coeficiente de almacenamiento del interflujo	0.0494108
KI	1/d	Coeficiente de almacenamiento del flujo base	0.0119497
Kperc	1/d	Coeficiente de almacenamiento de la percolación	0.33871

Nota. Adaptado de Calixto (2021).

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

Se aplican, calibran y validan los modelos hidrológicos GR4J y HBV para la generación de caudales en la cuenca del río Pachachaca. Se reportan y analizan los resultados para los periodos de calibración (2019-2021) y validación (2022-2023). La precisión y el desempeño de los modelos se evaluaron utilizando medidas estadísticas que incluyen el coeficiente relativo (RRMSE) y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

5.1.1. Modelo GR4J

Durante el procedimiento de calibración se obtuvieron resultados no favorables sobre la capacidad del modelo GR4J para reproducir los caudales observados en la cuenca. Dado que el NSE negativo sugiere que las predicciones del modelo son peores que la simple utilización de la media de los valores observados como estimación, el NSE obtenido de -6,84 denota un rendimiento extremadamente malo. Este resultado demuestra la limitada capacidad del modelo para representar con precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca a lo largo del periodo de calibración.

El coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.27, lo cual refleja una correlación muy débil entre los valores reales. Asimismo, el RRMSE alcanzó un valor de 2.59, lo que indica un error elevado en la estimación de los caudales.

En la fase de validación, el desempeño del modelo GR4J se deterioró aún más. El NSE fue de -325.75, lo cual es un valor muy bajo y refuerza la conclusión de que el modelo no es capaz de generalizar correctamente cuando se aplica a datos que no fueron utilizados en el proceso de calibración. La asociación entre los datos simulados y los observados fue prácticamente escasa, como demuestra el coeficiente de Pearson, que cayó hasta 0,14. Además, el RRMSE aumentó bruscamente hasta 20,36, lo que indica una gran variación entre los resultados simulados y los reales. Además, el RRMSE aumentó bruscamente hasta 20,36, lo que indica una gran variación entre los

resultados simulados y los reales. Estos resultados demuestran que la estructura del modelo GR4J o los datos disponibles pueden no ser consistentes con el comportamiento real del sistema, y que no representa suficientemente las condiciones hidrológicas de la cuenca del río Pachachaca.

5.1.2. Modelo HBV

En contraste con el modelo anterior, el modelo HBV presentó un desempeño considerablemente mejor durante el proceso de calibración. La capacidad razonable del modelo para reproducir los caudales observados durante el periodo de calibración viene indicada por el NSE de 0,59, que es un ajuste aceptable. De acuerdo con la literatura hidrológica, un NSE mayor a 0.5 puede considerarse como indicativo de un buen ajuste, especialmente en regiones con alta variabilidad climática.

Existe una correlación significativa entre los caudales simulados y observados, como indica el coeficiente de correlación de Pearson de 0,79. La capacidad del modelo para el periodo calibrado quedó confirmada por el RRMSE de 0,59, que mostró un grado comparativamente bajo de inexactitud en la estimación del caudal.

Sin embargo, durante la fase de validación, el modelo HBV también evidenció una reducción en su capacidad predictiva. El NSE descendió a -28.60, valor que indica una pérdida importante en la eficiencia del modelo al ser aplicado a un conjunto de datos diferente al de la calibración. El coeficiente de Pearson bajó a 0.07, señalando una correlación casi inexistente. Asimismo, el RRMSE se elevó a 6.48 reflejando un incremento considerable en el error de estimación.

Pese a estos resultados negativos en la validación, el modelo HBV demostró ser superior al modelo GR4J, en todas las métricas durante ambas fases. Esto sugiere que la estructura conceptual del modelo HBV, que incluye componente como almacenamiento en suelo y nieve, puede estar mejor adaptada a las condiciones hidrológicas de la cuenca.

5.1.3. Comparación entre modelos

Comparación de los indicadores estadísticos permite establecer que el modelo HBV superó de forma consistente al modelo GR4J en términos de ajuste y precisión durante la fase de calibración. En esta etapa, HBV obtuvo un NSE positivo y una alta correlación, mientras que GR4J presentó indicadores que evidencian un desempeño inadecuado. Esta diferencia puede atribuirse a la mayor complejidad del modelo HBV, que permite una representación más detallada del proceso hidrológico.

Aunque el modelo GR4J tuvo el peor desempeño a lo largo de la fase de validación, ambos modelos demostraron una notable disminución en su desempeño. Estos resultados muestran que, si bien ambos modelos pueden ser utilizados para generar caudales en la cuenca del río Pachachaca, su exactitud y capacidad de generalización están limitadas por los datos disponibles y las circunstancias de calibración.

En resumen, los resultados confirman que existen diferencias significativas entre el desempeño de los modelos GR4J y HBV, las cuales fueron evidenciadas a través de los indicadores de eficiencia, correlación y error. Además, se descubrió que, a pesar del mejor rendimiento del modelo HBV, ninguno de los modelos produjo una previsión adecuada durante todo el tiempo de validación. Esto sugiere que es necesario mejorar la calidad de los datos de entrada, ampliar el periodo de calibración o tomar en consideración métodos de modelados alternativos.

5.2. Discusiones

En contraste con la investigación de **Mohammadi et al, (2022)**. El modelo GR4J en la cuenca del río Pachachaca tuvo un desempeño notablemente peor, según los resultados de la tesis, con coeficientes de Nash-Sutcliffe negativos tanto para la etapa de calibración como para la de validación.

Esta disparidad resalta lo crucial que es tener en cuenta las particularidades de cada cuenca y la posible adición de factores meteorológicos particulares y métodos de

aprendizaje automático para aumentar la precisión del modelo GR4J en cuencas con características distintivas, como el río Pachachaca.

Así también, la comparación entre el trabajo de **Kumari et al, (2021)**. Con los resultados de la tesis revela una discrepancia notable, donde el modelo GR4J demostró un desempeño pobre en la cuenca del río Pachachaca. Esta diferencia puede atribuirse a varias razones, incluida la complejidad hidrológica de la cuenca estudiada en la tesis, que puede haber requerido un enfoque más complejo o la adaptación del modelo GR4J a las condiciones específicas de la cuenca.

Por otro lado, al realizar la comparación del enfoque implementado por **Wei et al, (2021)**. Con los resultados alcanzados en esta tesis, resulta importante plantear la necesidad de una estrategia de calibración más refinada para el GR4J en la cuenca del río Pachachaca. Adaptación de técnicas similares a las utilizadas por Wei et al. (2021). Podría incrementar la mejora en el rendimiento del modelo GR4J, considerando la variabilidad climática y las condiciones hidrológicas específicas de la cuenca del río Pachachaca.

Al realizar el contraste de esta tesis con los estudios llevados a cabo por **Kunnath-Poovakka y Eldho, (2019)**, Se observa una diferencia muy marcada en los resultados. En este estudio, el rendimiento del modelo GR4J fue muy inferior al observado en la cuenca del río Pachachaca. La complejidad del caso estudiado y la necesidad de una calibración y validación más exhaustivas podrían ser la causa de la discrepancia en los resultados.

Chávez, (2016). En su investigación concluyó que el modelo GR4J no era funcional para la zona sur de la costa peruana, coincidiendo con los hallazgos de esta tesis; los resultados de **Chávez, (2016)**. Señala la importancia de considerar las peculiaridades regionales y las características específicas de la cuenca al aplicar los modelos hidrológicos.

En lo concerniente a los estudios llevados cabo por **Ali et al, (2018)**. Y comparando con los hallazgos en esta tesis se observa una diferencia muy marcada. El

valor del coeficiente de Pearson obtenido por **Ali et al, (2018)**. En el desarrollo de su modelo hidrológico fue de 0.93 que comparado al valor de esta tesis resultó superior. Aunque las métricas específicas varían, la consistencia en el rendimiento destaca la robustez del modelo HBV.

Los estudios de **Coras, (2019)**. Resalta el modelo HBV como el de mejor desempeño entre varios modelos evaluados; este modelo presenta coeficientes de Nash y Pearson relativamente altos en la etapa de calibración que, coinciden con los hallazgos de esta tesis.

De igual modo, los estudios de **Vergaray (2018), Aliaga (2017), Yaranga (2017), y Chávez, (2016.)** Sugiere la versatilidad del modelo. La comparación con la tesis actual enfatiza la relevancia de adaptar, para maximizar su rendimiento, el modelo HBV está calibrado y validado según las circunstancias únicas de cada cuenca.

VI. Conclusiones

Los resultados de este estudio mostraron que ambos modelos presentaron dificultades considerables durante las fases de calibración y validación, lo que indica que no lograron representar plenamente la complejidad hidrológica de la cuenca en cuestión. En consecuencia, se puede afirmar que:

Al reproducir flujos en la cuenca del río Pachachaca, el modelo GR4J no tuvo un buen desempeño. Su estructura simple limitó su capacidad para capturar eventos hidrológicos extremos, como picos de caudal en épocas de lluvia.

El modelo HBV tuvo un mejor desempeño en la etapa de calibración, pero su precisión bajó significativamente en la etapa de validación. Esto sugiere que no logró adaptarse a condiciones fuera del período de calibración.

VII. Recomendaciones

Se recomienda las siguientes acciones que permitan continuar con la línea de investigación planteada.

Se recomienda tener en cuenta la variabilidad climática al evaluar el desempeño y utilizar técnicas de optimización sofisticadas para mejorar la calibración de los modelos hidrológicos.

Para mejorar la precisión de la modelación se sugiere complementar el estudio con modelos semi – distribuidos o técnicas de machine learning.

Es fundamental ampliar la base de datos hidrometeorológicos, mejorando la cobertura de estaciones meteorológicas y complementando con sensores remotos.

Se recomienda utilizar modelos climáticos regionales para evaluar cómo el cambio climático está afectando la cuenca del río Pachachaca.

Se recomienda que los hallazgos de este estudio se apliquen para mejorar la gestión de los recursos hídricos y crear planes para reducir el riesgo hidrológico.

VIII. Referencias

- Ali, A. F., Xiao, C., Zhang, X., Adnan, M., & Iqbal, M. (2018). Projection of future streamflow of the Hunza River Basin, Karakoram Range (Pakistan) using HBV hydrological model. *J. Mt. Sci*, 15, 2218-2235. doi:10.1007/s11629-018-4907-4
- Aliaga, I. (2017). Modelación hidrológica de la cuenca del Río Huallaga aguas arriba del punto de control Santa Lorenza. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Allen, R. G., Doorenbos, J., & Monteith, L. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje, boletín 56.
- Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI RHO 7.
- Beven, J. (1985). *Distributed models*. Wiley.
- Cabrera, J. (4 de marzo de 2023). Modelos hidrológicos. Obtenido de Modelos hidrológicos: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Calixto, M. (2021). Modelamiento hidrológico con GR4J para el pronóstico de caudales medios diarios con horizonte de 72 horas en la cuenca del río Huallaga. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chávez, A. (2016). Modelos hidrológicos para la generación de caudales diarios en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan - Ica. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw.
- Coras, N. (2019). Modelación hidrológica para generación de caudales diarios en la subcuenca Shullcas. Universidad Nacional Agraria La Molina.

- de la Lanza, G., Cáceres, C., Adame, S., & Hernández, S. (1999). Hidrología y ciencia afines. Universidad Autónoma de México.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.126.
- Fernández, M., Vela, M., & Castaño, F. (1997). La utilización de modelos en hidrología. Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla La Mancha.
- Kumari, N., Srivastava, A., Sahoo, B., Raghuwanshi, N., & Bretreger, D. (2021). Identification of Suitable Hydrological Models for Streamflow Assessment in the Kangsabati River Basin, India, by Using Different Model Selection Scores. *Natural Resources Research*, 30, 4187-4205. doi:10.1007/s11053-021-09919-0
- Kunnath-Poovakka, A., & Eldho, T. (2019). A comparative study of conceptual rainfall-runoff models GR4J, AWBM and Sacramento at catchments in the upper Godavari river basin, India. *Journal of Earth System Science*, 128(33), 2-15. doi:10.1007/s12040-018-1055-8
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: definición, propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica*, III(1), 1390-9592.
- Lujano, E., Sosa, J., & Lujano, A. (2020). Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4j, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú. *INGENIERÍA UC*, 27(2), 189-199.
- Mediero, L. (2021). Hidrología. Ediciones Paraninfo S.A.
- Mohammadi, B., Safari, M., & Vazifekhah, S. (2022). IHACRES, GR4J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling. *Scientific reports*, 12(12096), 1-21. doi:10.1038/s41598-022-16215-1
- Molnar, P. (2011). Notes of watershed modelling. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hidrology and Water Resources Management. ETH Zürich.

- Ochoa - Tocachi, B., Cuadros, J., Arapa, E., Aste, N., Ochoa - Tocachi, E., & Bonnesoeur, V. (2022). Guía de modelación hidrológica. USAID.
- Ochoa - Tocachi, B., Tenelanda - Patiño, D., & Ochoa - Pérez, P. (2020). Módulo de calibración automática del modelo FONAG 2.1. Generar y actualizar insumos y herramientas hidro - físicas, hidrométricas, hidro - informáticas e hidroeconómicas para apoyar la toma de decisiones en la planificación hídrica del FONAG. ATUK Consultoria Estratégica y Fondo de Protección del Agua (FONAG).
- Ordoñez, J. (2011). Ciclo hidrológico. Sociedad Geográfica de Lima.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*(279), 275-289.
- Ponce, V. (1983). *Engineering Hydrology*. Prentice Hall.
- Refsgaard, J., & Abbott, M. (1996). *Distributed hydrological modelling*. Kluwer Academic Publishers.
- Salgado, J., & Güitrón, A. (2012). Aplicabilidad de los modelos hidrológicos. Obtenido de http://www.revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/articulos/legislacionydocencia/319APLIC
- Santos, D. (2016). Oferta hídrica superficial del río Coata - Puno bajo escenarios de cambio climático. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Servicio Forestal de los Estados Unidos. (4 de marzo de 2023). Cuencas. Obtenido de https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5338930.pdf
- Valverde, J. C. (2007). *Riego y drenaje*. Editorial Universidad Estatal a Distancia.

- Vergaray, E. (2018). Simulación de los caudales de ingreso al embalse Torata - Moquegua mediante modelos de precipitación - escorrentía. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Wei, X., Guo, S., & Xiong, L. (2021). Improving Efficiency of Hydrological Prediction Based on Meteorological Classification: A Case Study of GR4J Model. *Water*, 13(18), 1-14. doi:10.3390/w13182546
- Yaranga, D. (2017). Simulación hidrológica en la cuenca del río Mala usando modelos hidrológicos agregados y semidistribuidos. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes