

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**

“APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO
GR4J PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES
DIARIOS UTILIZANDO CONJUNTO DE DATOS
GRILLADOS ERA5 EN LA CUENCA DEL RÍO
ZAÑA HASTA LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA
BATAN”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Civil

Forma: Artículo científico

Autores:

Gabriela Alejandra Arias Reategui
Alessandra Joseline Bazalar Delgado

Asesor:

Mg. Abel Carmona Arteaga
<https://orcid.org/0000-0003-2895-9582>

Lima - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	NEICER CAMPOS VASQUEZ	42584435
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	JOSE NEYRA TORRES	21454204
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	ABEL CARMONA ARTEAGA	41961365
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

AC_Arias Gabriela_Bazalar Alessandra (1)

ORIGINALITY REPORT

10%	8%	3%	2%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repositorio.usil.edu.pe Internet Source	<1 %
2	Huaman Pajares Felix Armando, Rimarachin Mosquera Virgilio, Ruben Kevin Manturano Chipana, Neicer Campos Vasquez. "Determination of the maximum degree of inclination of the straight columns of a 4-story building based on its seismic behavior, Cajamarca, 2020", 2022 IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON), 2022 Publication	<1 %
3	cartografiaperu.blogspot.com Internet Source	<1 %
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Student Paper	<1 %
5	accionxelclima.wordpress.com Internet Source	<1 %
6	bvs.sld.cu Internet Source	<1 %

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación lo dedico en primer lugar a mis padres por brindarme las oportunidades para seguir la carrera y por darme ese cariño incondicional, por esto son muy importantes en mi vida.

Bazalar Delgado Alessandra Joseline

Dedico este trabajo de investigación a mis padres por su apoyo incondicional, quienes me ayudaron a cumplir mis metas.

Arias Reátegui Gabriela Alejandra

AGRADECIMIENTO

Agradezco de corazón a todos los docentes que me hicieron amar la carrera por su excelente enseñanza y experiencia.

Bazalar Delgado Alessandra Joseline

Agradecer a la universidad por brindarnos infraestructura, conocimiento y esa amplia gama de docentes calificados en la materia para poder guiarnos en el transcurso de nuestra carrera profesional.

Arias Reátegui Gabriela Alejandra

Tabla de Contenido

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN	7
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	14
CAPÍTULO III: RESULTADOS	18
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	28
REFERENCIAS	31

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es simular caudales diarios utilizando el modelo hidrológico GR4j aplicado a una subcuenca del río Zaña delimitada desde la estación hidrométrica Batan. Por un lado, se recopiló información de caudales a nivel diario de la estación convencional entre el periodo 2015-2020, la cual fue utilizada para la calibración del modelo. Por otro lado, se obtuvo información de caudales a paso diario entre el periodo 2000-2015 para la validación de este. Asimismo, se extrajo información de precipitación y temperatura promedio utilizando el conjunto de datos grillados de ERA5 pertenecientes al satélite Copérnico de la agencia espacial Europea, mediante la plataforma Google Earth Engine. Se realizó el análisis de los resultados teniendo como criterios de eficiencia el coeficiente de Nash y el de determinación (R^2). Finalmente, en base a los resultados obtenidos en la calibración y validación, se afirma que el modelo hidrológico GR4j presenta un buen desempeño en la estimación de caudales medios diarios.

PALABRAS CLAVES: Precipitación, temperatura, caudal, modelo hidrológico GR4j, ERA5, Google Earth Engine.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En estos últimos años se ha registrado numerosas inundaciones en muchas cuencas de la vertiente del pacífico. Uno de los países más afectados frente a estos eventos es Perú. Actualmente, se vienen realizando numerosos estudios para la ejecución de obras que ayuden a mitigar estos desastres; sin embargo, para realizarlas se requieren registros históricos de medición de caudales de larga data en las zonas afectadas.

Una de estas cuencas afectadas es la del río Zaña, la cual sufre crecidas en el nivel de su cauce principal; lo que preocupa a las autoridades, ya que esta emergencia genera el aislamiento de centros poblados y la inundación de campos de cultivo [1]. Lamentablemente, para esta cuenca no existe información hidrométrica a paso diario; lo que impide el correcto diseño de obras hidráulicas de prevención para estos eventos. Debido a la falta de información hidrológica a paso diario se han desarrollado modelos de precipitación escorrentía que puedan generar series históricas de caudales usando productos climáticos satelitales.

Por lo tanto, en el presente trabajo se plantea la aplicación del modelo hidrológico de ingeniería rural de 4 parámetros GR4j, cuyas siglas en francés es (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier), el cual se usará para la estimación de caudales a nivel diario de la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán, empleando datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (GEE) y los registros de caudal promedio diario (m³/s) descargados de los servidores de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

A. Área de estudio

La cuenca del río Zaña pertenece al sistema hidrográfico de la vertiente del océano pacífico, comprende una superficie de 1745 km². Geográficamente, se encuentra entre los

paralelos 06°46' y 07°06' de latitud sur y los meridianos 78°54' y 79°44' de longitud oeste. Por otro lado, se encuentra ubicada políticamente en la provincia de Chiclayo, departamento Lambayeque, la provincia de Santa Cruz y San Miguel, departamento Cajamarca [2].

Asimismo, los límites hidrográficos para la cuenca son: Por el norte con la cuenca del río Chancay – Lambayeque, por el sur con la cuenca del río Jequetepeque, por el este con la cuenca del río Chancay - Lambayeque y Jequetepeque, y por el oeste con el Océano Pacífico.

B. Estudios previos del uso del modelo hidrológico GR4j

Se realizó una revisión de las investigaciones relacionadas con el uso del modelo GR4J. Con el fin de identificar la viabilidad de la aplicación de modelo para la estimación de caudales diarios. A continuación, se presentan las investigaciones más destacables:

Carvajal y Roldán en la investigación: Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4j aplicación: Cuenca del río Aburrá: tiene como objetivo mostrar la calibración del modelo lluvia-escorrentía GR4j en ocho subcuencas de la cuenca del río Aburrá, dando como resultado una representación satisfactoria de la serie de caudales diario, por otro lado presento un desempeño adecuado en las estaciones cuya serie de caudales estaba afectada por los caudales de agua residual provenientes de la zona urbana, así también presenta una fácil implementación del modelo a comparación de otras que presentan más de cuatro parámetros [3].

Al respecto Lujano en su investigación Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú. Se evaluó el desempeño de tres modelos hidrológicos para el pronóstico de caudales medios diarios en una cuenca del altiplano peruano, dando como resultado que la evaluación del desempeño de modelos hidrológicos del Departamento de

Balance Hídrico de la Oficina Hidrológica (HBV) , GR4j y Contribución del Suelo (SOCONT) para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, mostraron buenos estadísticos para el conjunto de datos de calibración y validación pudiendo ser considerados como herramientas robustas para el pronóstico de caudales. Sin embargo, el modelo GR4j, a pesar de utilizar solo cuatro parámetros, representa adecuadamente mejor las magnitudes y la variabilidad de caudales en periodos de avenida y estiaje [4].

C. Data cartográfica

La información cartográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) se recopiló en formato Shapefile a escala 1:100000 del aplicativo de descargas del Ministerio de Educación del Perú. Las hojas de la Carta Nacional que abarcan el área de estudio son:

Tabla 1 Hojas de la carta nacional

N° de carta	Nombre
14 – d	Chiclayo
14 – e	Chongoyape
14 – f	Chota
15 – d	Pacasmayo
15 – e	Chepén
15 – f	Cajamarca

Fuente: Elaboración propia

D. Data pluviométrica

La información pluviométrica se recopiló mediante el nuevo conjunto de datos de ERA5 generado por el Servicio de Cambio Climático de Copérnico, que forma parte del programa de monitoreo de la Tierra de la Unión Europea e implementado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) [5]. Esta información se

descargó mediante la plataforma GEE usando los códigos creados por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga [6].

Para el desarrollo de la calibración del modelo, se utilizó la precipitación promedio a paso diario del periodo 2015-2020 de una subcuenca del río Zaña. Asimismo, se utilizó la precipitación promedio a nivel diario del periodo 2000-2015 para la validación del mismo.

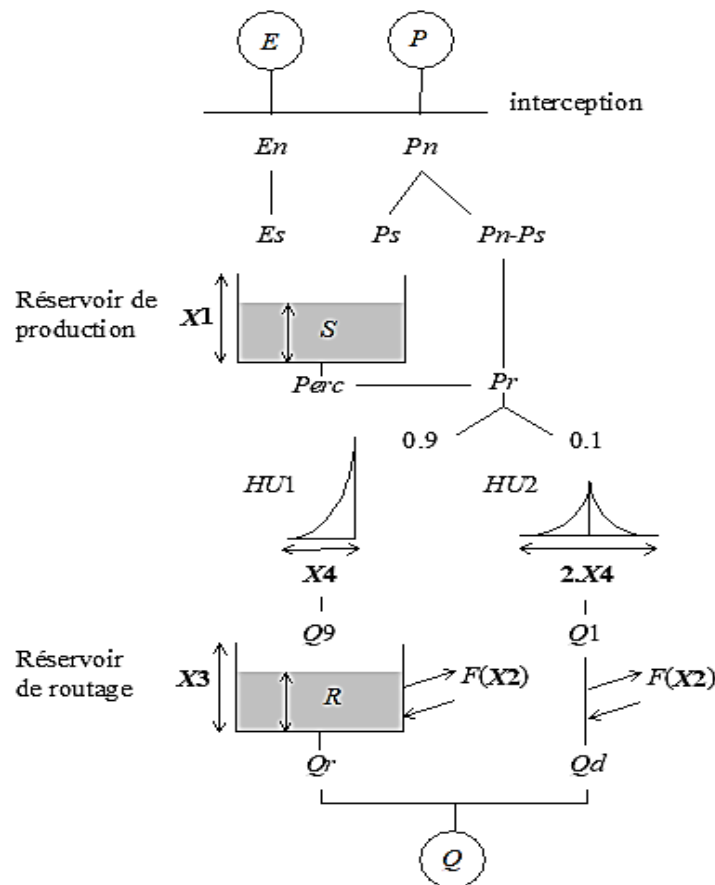


Figura 1 Modelo hidrológico GR4J. Fuente: Carvajal, L. y Roldán, E. (2007)

E. Data climatológica ordina

La información climatológica requerida para el desarrollo de la calibración del modelo fue la temperatura promedio a nivel diario del periodo 2015-2020 en la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán empleando el conjunto de datos grillado climatológicos ERA5 a paso diario descargados por la plataforma GEE. Asimismo, se

extrajo la temperatura promedio a paso diario del periodo 2000-2015 para la etapa de validación.

F. Data hidrométrica

La información hidrométrica fue proporcionada por la ANA. La cuenca del río Zaña cuenta con varias estaciones convencionales, entre ellas: Batan, Corbacho, La Leonera, Portachuelo y Puente Motete. Para la calibración del modelo se consideró la información de caudales diarios del periodo 2015-2020 en la estación Batan, debido a que la estación se encuentra dentro de la subcuenca que se delimito para realizar el estudio. Asimismo, se consideró la información de caudales diarios del periodo 2000-2015 para el desarrollo de la etapa de validación del modelo [7].

G. Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma que guarda grandes cantidades de productos satelitales climáticos en diferentes escalas temporales, así como datos geoespaciales, poniéndolos a disposición para la extracción de datos a una escala global [8].

H. Modelo hidrológico GR4j

El modelo GR4j sirve para simular la precipitación-escorrentía de manera diaria, empleando los registros de la estación cercana a la cuenca a utilizar para calcular la precipitación (P) y la evapotranspiración (E) que puede ser un valor promedio diario a largo plazo [3]. A continuación, se presentan los parámetros del modelo:

- X1 (mm): Capacidad máxima del tanque de producción
- X2 (mm): Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas
- X3 (mm): Capacidad máxima para el tránsito en canales
- X4 (días): Tiempo base del hidrograma unitario UH1

I. Método Malnstrom

El método utiliza la presión de vapor a saturación (e_s) para estimar la evapotranspiración potencial [9]. A continuación, se presenta la expresión:

$$ET_o = 4.09 * e_s \quad (1)$$

Donde e_s está dada por:

$$e_s = 6.11 * e^{\left(\frac{17.27 * T_m}{237.3 + T_m}\right)} \quad (2)$$

T_m – Temperatura media mensual en °C

e – Número de Euler

J. Equipos y programas de cómputos

El proceso de información requirió del uso de equipos de cómputo tales como computadora de escritorio y laptop con el sistema operativo Windows 10. Asimismo, las herramientas de cómputo empleadas fueron:

- ArcGis 10.8 empleado para el procesamiento de información, edición y elaboración de mapas.
- ArcHydroTools utilizado para la delimitación de cuencas y subcuencas.
- Microsoft Excel empleado en el cálculo del modelo hidrológico y la elaboración de cuadros y gráficos.
- Microsoft Word utilizado para la edición y elaboración del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

En esta sección, se detallan los procedimientos utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

A. Métodos de evaluación del modelamiento hidrológico - GR4J

En esta sección, se detallan los criterios de eficiencia considerados en las etapas del modelo hidrológico GR4J (calibración y validación) para determinar las medidas de bondad del ajuste.

B. Calibración del modelo hidrológico

Esta etapa tiene como objetivo obtener valores óptimos de los parámetros incluidos en el modelo con la finalidad de obtener un sistema lo más próximo al sistema real que el modelo representa. Consiste en experimentar con varias combinaciones de valores de parámetros en un esfuerzo por minimizar o maximizar alguna optimización. Para Friswell & Mottershead, la calibración de un modelo de elemento finito puede definirse como un proceso cuyo objetivo es afinar el modelo matemático de una estructura física para que refleje el comportamiento estructural observado experimentalmente [10]. A continuación, se detallan los criterios de eficiencia considerados en la etapa de calibración:

- a. Coeficiente de Nash – Sutcliffe (E). Es un criterio de evaluación que cuantifica la eficiencia entre un modelo simulado y uno observado midiendo cuánta variabilidad de las observaciones es aplicada por la simulación. Se expresa de la siguiente manera:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3)$$

Donde:

Q_{sim} – Caudales simulados en m³/s

Q_i – Caudales observados en m³/s

\bar{Q} – Promedio de los caudales observados en m³/s

A continuación, se presenta una tabla con los valores referenciales del criterio de Nash:

Tabla 2 Hojas de la carta nacional

Nash	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Elaboración propia

- b. Criterio de Nash – Sutcliffe logarítmico. Es utilizado cuando los valores de la variable simulada son muy grandes. Se define de la siguiente manera:

Donde:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{sim,i}) - \log(Q_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_i) - \log(\bar{Q}))^2} \quad (4)$$

$Q_{sim,i}$ – Descarga simulada en un tiempo i en m³/s

Q_i – Descarga observada en un tiempo i en m³/s

\bar{Q} – Promedio de descargas observadas en el periodo de tiempo considerado en m³/s

- c. Coeficiente de Determinación (R^2). Es el cuadrado del coeficiente de correlación, el cual varía entre 0 a 1. Se define de la siguiente manera:

Donde:

$$R^2 = 1 - \frac{Cov(Q_0, Q_s)}{Sd(Q_0)Sd(Q_s)} \quad (5)$$

$Cov(Q_0, Q_s)$ – Covarianza de los caudales observados y estimados.

$Sd(Q_0)$ – Desviación típica de los valores observados.

$Sd(Q_s)$ – Desviación típica de los caudales estimados.

Asimismo, es utilizado como medida de dispersión del modelo hidrológico mientras más cercano sea el valor del coeficiente a 1; entonces, el modelo se ha ajustado de manera óptima [11].

C. Validación del modelo hidrológico

Esta etapa tiene como objetivo verificar la calidad de los ajustes del proceso de calibración, calidad y confiabilidad de la información disponible para el funcionamiento del modelo. Asimismo, para la validación del modelo, se utiliza los mismos criterios de eficiencia para el análisis de resultados mencionados en la etapa de calibración. Cabe resaltar que en ambas etapas se emplea la verificación del ajuste al comparar visualmente la curva de duración de caudales reales y estimados.

D. Diagrama de Flujo

En la figura 2, se presentan el proceso que se siguió para la realización del presente trabajo de investigación:

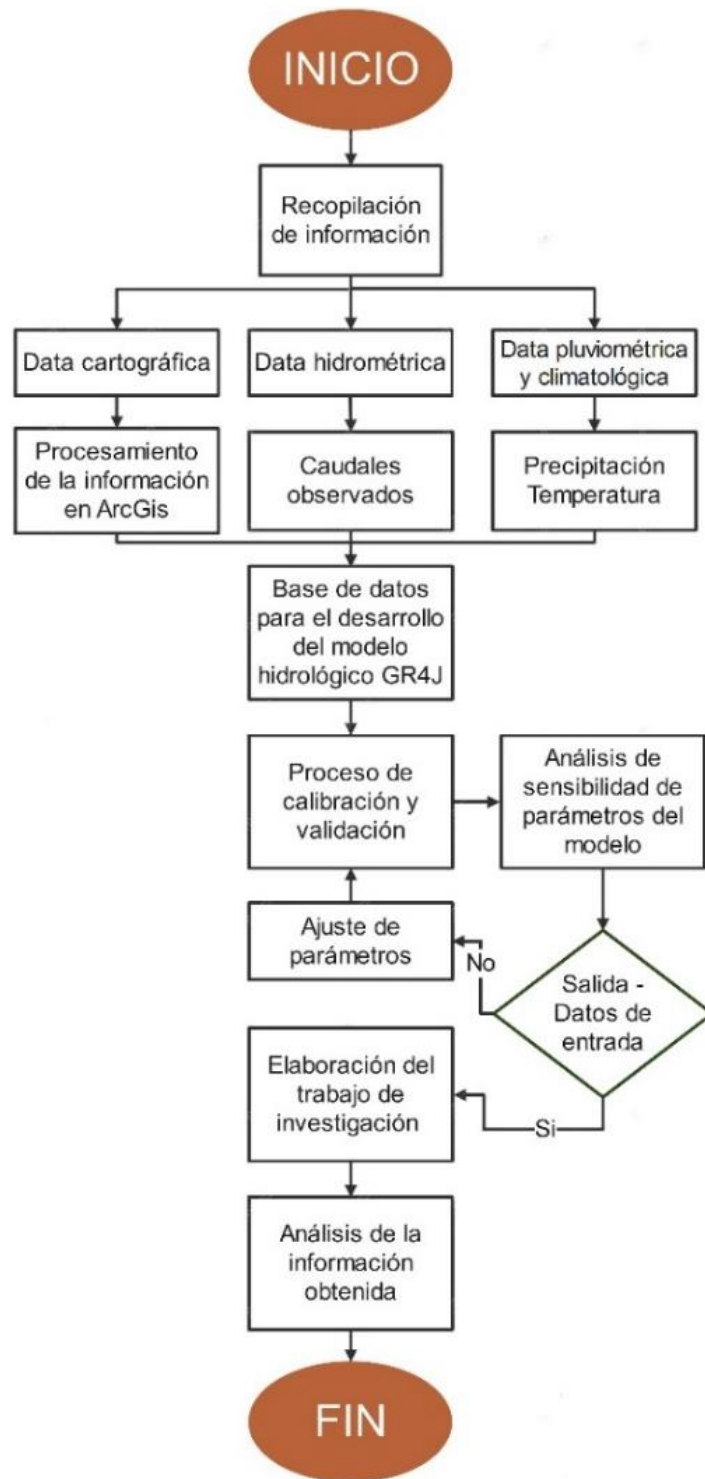


Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Se presenta el análisis de los resultados obtenidos dándole principal énfasis a la interpretación del comportamiento de los caudales simulados durante las etapas de calibración (del 01/12/2015 hasta el 08/07/2020) y validación (del 01/01/2000 hasta 30/11/2015) del modelo hidrológico GR4J aplicado en una subcuenca del río Zaña.

A. Simulación del comportamiento hidrológico

Para la calibración se observa que los criterios de eficiencia se encuentran dentro del rango de evaluación y son cercanos a los valores ideales. Según la Tabla 2, el ajuste es bueno cuando el coeficiente de Nash se encuentra entre 0.6 – 0.8. En este caso, el valor de Nash resulta 64.3%. Por lo tanto, se interpreta que el ajuste realizado es bueno.

Tabla 3 Resumen de criterios de eficiencia (%) en la etapa de calibración

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	64.21
Nash(VQ)	65.18
Nash(ln(Q))	56.91
Bilan	96.42

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4, se presentan los valores iniciales y los parámetros calculados de la subcuenca del río Zaña obtenidos mediante la aplicación del modelo:

Tabla 4 Parámetros del modelo GR4J en la etapa de calibración

Nombre de la cuenca		Zaña - Batán
Superficie de la cuenca (km ²)		630.95
Valores iniciales		
Tasa de llenado inicial S0/x1		0.6
Tasa de llenado inicial R0/3		0.7
Parámetros	Unidad	Transf.
X ₁	mm	8.03
X ₂	mm	-1.76
X ₃	mm	4.53
X ₄	días	-13.62

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en la Tabla 5, se muestran los valores promedios de los datos hidrométricos obtenidos con la aplicación del modelo para la calibración.

Tabla 5 Promedios de los datos hidrométricos utilizados en la etapa de calibración

Precipitación media observada (mm/día)	4.089
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.956
Caudales medios observados (mm/día)	1.153
Promedio de las raíces de los caudales observados	0.951
Logaritmo promedio de flujos observados	-0.265

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 3, se observa la correlación entre los caudales observados con los caudales estimados. Debido a que el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.6599$) es cercano a 1, se interpreta que el modelo se ajustó adecuadamente. Cabe resaltar que la línea de tendencia de la gráfica es lineal [12].

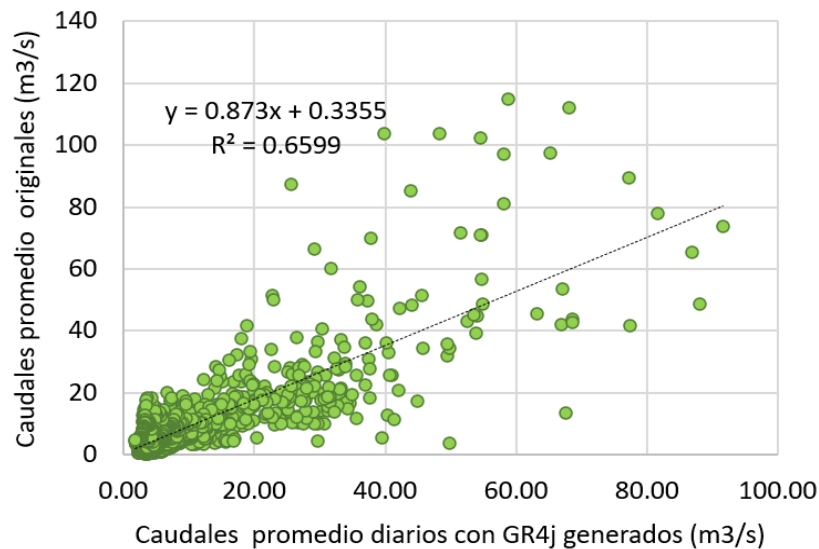


Figura 3 Curva de calibración entre caudales diarios generados con el método GR4j y caudales diarios registrados para la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batan (1/12/2015 - 8/7/2020).

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4, se observa los hidrogramas unitarios obtenidos en la calibración. En la Figura 5, se presenta la comparación entre los caudales diarios generados por el modelo y los caudales observados obtenidos de la estación Batan para la etapa de calibración. En general, se observa que los valores de caudales estimados (línea azul) se adecuan a los caudales reales obtenidos de la estación hidrométrica (línea anaranjada).

De manera particular, existe una sobrestimación en de los caudales generados el día 16/1/2018. Asimismo, es notoria una subestimación de los caudales registrados los días 7/3/2016, 25/3/2017 y a partir del día 25/2/2019 donde se registraron caudales por encima de los 100m³/s [13].

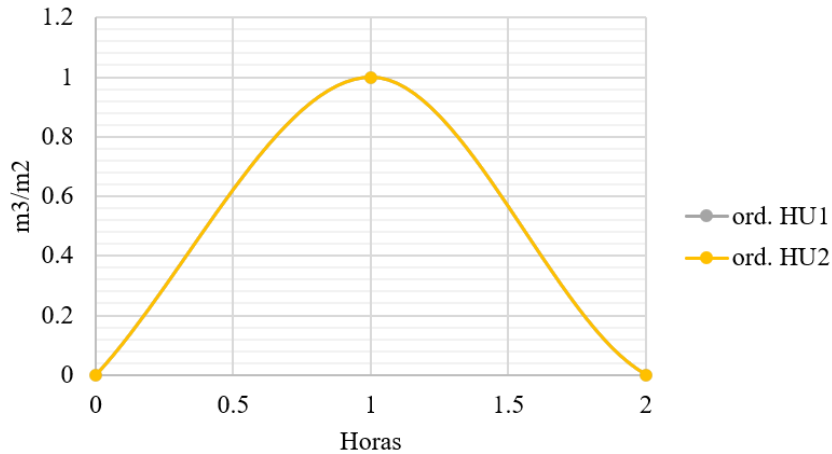


Figura 4 Hidrogramas unitarios para la etapa de calibración.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 6, se presenta una curva de calibración entre caudales generados mensuales de datos diarios en (m3/s) y caudales registrados promedio mensuales (m3/s), obteniendo un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.793$) cercano a 1. Por lo tanto, el ajuste del modelo es óptimo. Cabe resaltar que para elaborar la gráfica no se consideran los primeros 3 meses.

Para la validación se utilizó el periodo de referencia 01/01/2000 – 30/11/2015, pues lo ideal es no emplear el rango de años considerados en la calibración. En la tabla 6, se observa que los criterios de eficiencia obtenidos mediante el modelo se encuentran en un rango aceptable. Sin embargo, los valores son menores en comparación a los obtenidos en la calibración [14].

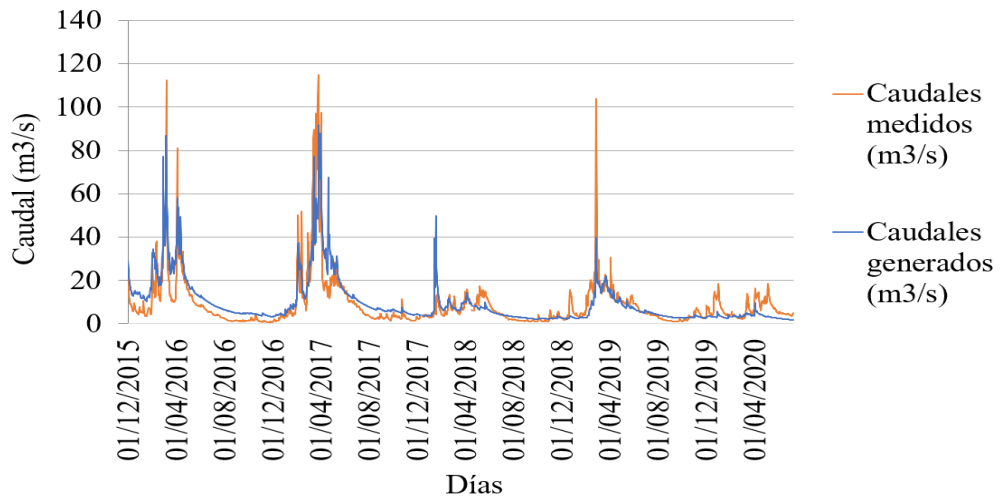


Figura 5 Comparación entre caudales diarios medidos y los caudales generados con datos de precipitación de ERAS5 y el método GR4j para la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán (1/12/2015 - 8/7/2020).

Fuente: Elaboración propia

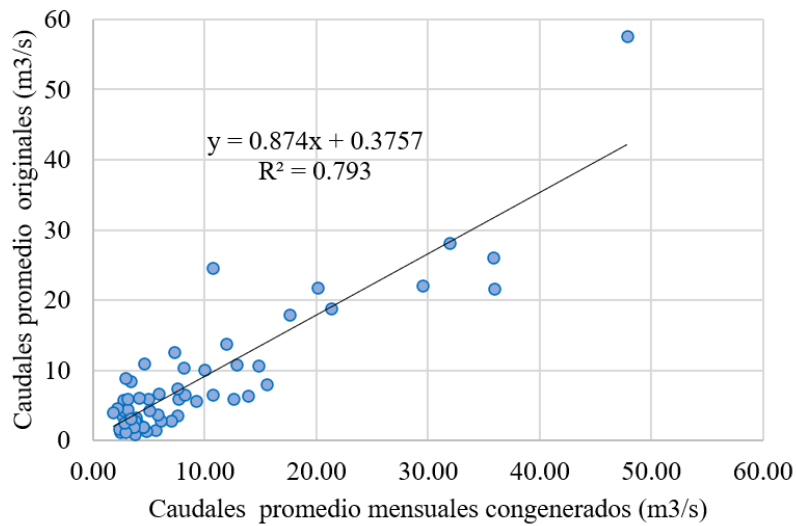


Figura 6 Curva de calibración entre caudales promedio mensuales generados con el método GR4j y caudales registrados para la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán (1/12/2015 - 8/7/2020).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Resumen de criterios de eficiencia (%) en la etapa de validación

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	48.4
Nash(VQ)	54.6
Nash(ln(Q))	51.1
Bilan	86.2

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 7, se presentan los valores iniciales y los parámetros calculados de la subcuenca del río Zaña obtenidos mediante la aplicación del modelo:

Tabla 7 Parámetros del modelo GR4J en la etapa de validación

Nombre de la cuenca		Zaña - Batan
Superficie de la cuenca (km²)		630.95
Valores iniciales		
Tasa de llenado inicial S0/x1		0.6
Tasa de llenado inicial R0/3		0.7
Parámetros	Unidad	Transf.
X ₁	mm	-9.98
X ₂	mm	-4.97
X ₃	mm	7.58
X ₄	días	-5.98

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se presentan los valores promedios de los datos hidrométricos obtenidos con la aplicación del modelo para la validación.

Tabla 8 Promedios de los datos utilizados en la etapa de validación

Precipitación media observada (mm/día)	3.634
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.918
Caudales medios observados (mm/día)	1.086
Promedio de las raíces de los caudales observados	0.938
Logaritmo promedio de flujos observados	-0.284

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7, se observa la correlación entre los caudales observados con los caudales generados por el modelo. Considerando una línea de tendencia lineal, se obtiene el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.5229$).

En la Figura 8, se presenta los hidrogramas unitarios obtenidos en la validación. Asimismo, en la Figura 9, se observa la gráfica de comparación de los caudales diarios generados por el modelo con los caudales observados obtenidos de la estación Batan para la etapa de validación.

En general, los valores de caudales estimados (línea azul) se adecuan a los caudales reales obtenidos de la estación hidrométrica (línea anaranjada). De manera particular, se observa una sobrestimación en los picos presentes en el para el día 2/4/2008, el cual reporta un caudal de 261 m³/s en la estación hidrométrica Batan. Esto se debe a un caudal máximo para la fecha reportado por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) en su informe

de emergencia N° 401 - 20/05/2008 Centro de Operaciones de Emergencia Nacional – Sistema Nacional de Defensa Civil, por sus siglas: COEN-SINADECI (INFORME N° 92).

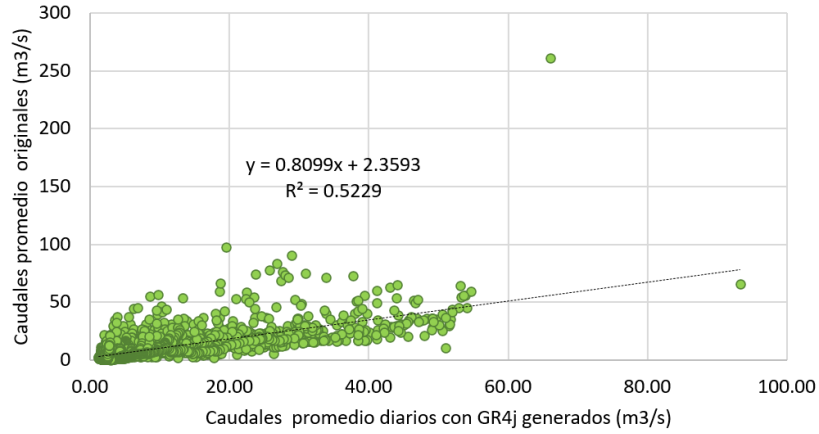


Figura 7 Correlación entre caudales observados y caudales generados por el modelo en la etapa de validación.

Fuente: Elaboración propia

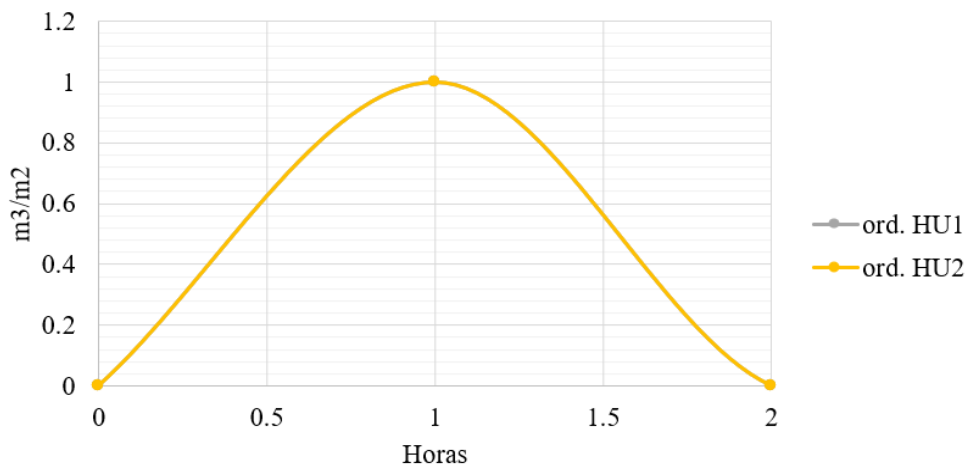


Figura 8 Hidrogramas unitarios para la etapa de validación.

Fuente: Elaboración propia

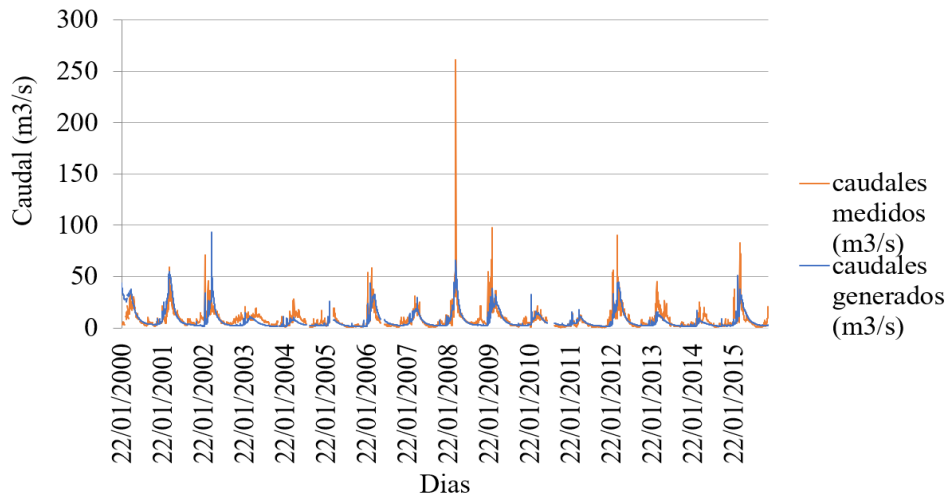


Figura 9 Comparación entre caudales diarios medidos y los caudales generados con datos de precipitación de ERA5 y el método GR4j para la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán (01/01/2000 - 30/11/2015).

Fuente: Elaboración propia

Gracias a los datos de los caudales generados y observados, se gráfica una curva de calibración entre caudales generados mensuales de datos diarios en (m³/s) y caudales registrados promedio mensuales (m³/s), obteniendo un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.7086$) cercano a 1. Por lo tanto, se considera que el ajuste resulta aceptable. Cabe resaltar que para realizar la elaboración gráfica no se consideran los primeros 3 meses [15].

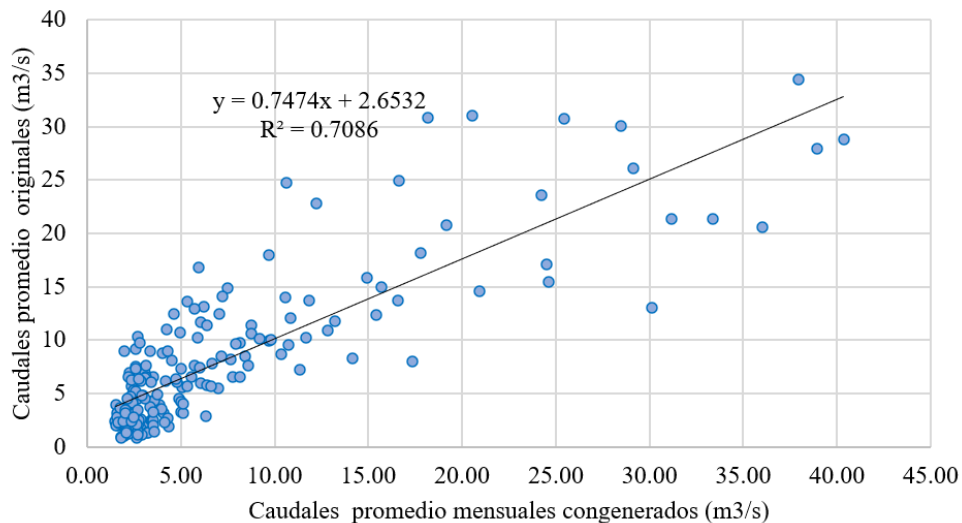


Figura 10 Curva de calibración entre caudales promedio mensuales generados con el método GR4j y caudales registrados para la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán (01/2000 - 11/2015).

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 11 se muestra la delimitación de la cuenca Zaña completa y hasta su cierre en la estación Batan, conjuntamente con las estaciones hidrométricas cercanas y dentro de la cuenca en estudio, esto con el fin de tener una mejor idea de la zona de estudio y obtener el valor del área de la cuenca en Km².

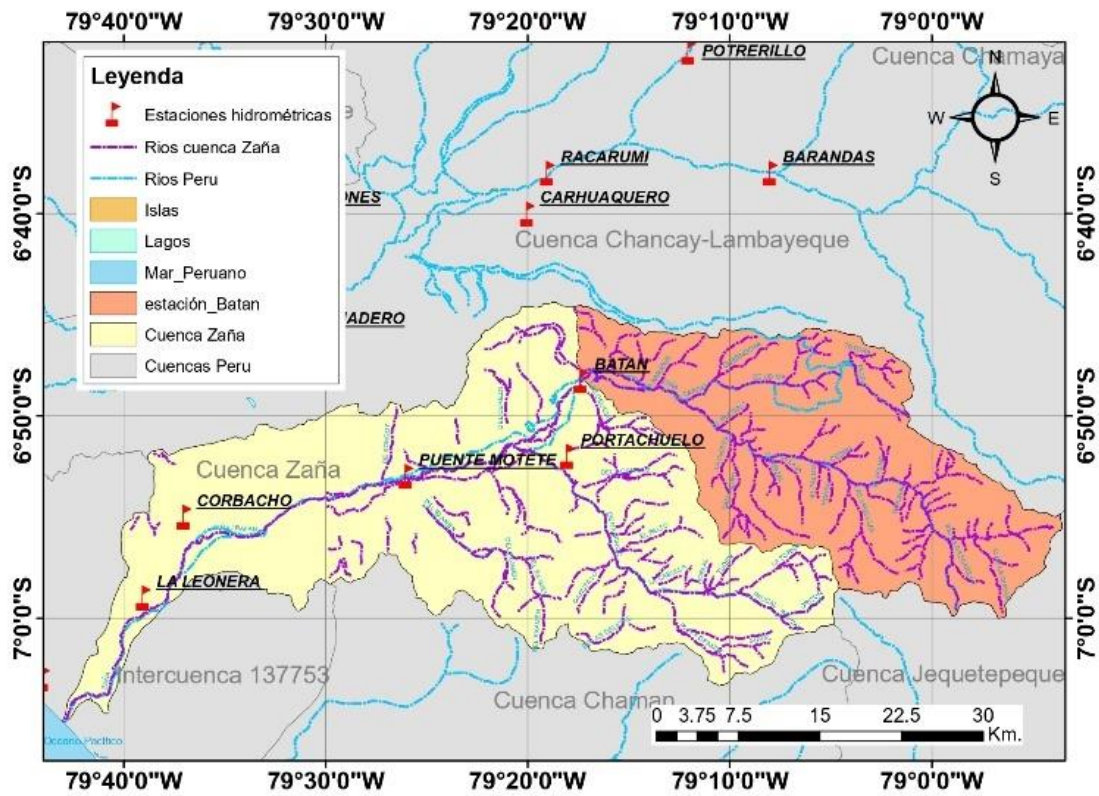


Figura 11 Delimitación de la cuenca Zaña completa y hasta su cierre en la estación hidrométrica Batan.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN.

El modelo hidrológico GR4j fue aplicado en la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batan con una extensión de 630.95 km². Para ello se utilizaron series de precipitación diaria y temperatura del conjunto de datos de ERA5 y caudales diarios del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) durante el periodo 01/01/2000 - 30/11/2015 para la etapa de calibración y el periodo 01/12/2015 - 08/07/2020 para la etapa de validación. Con el fin de comparar los caudales estimados por el modelo con los caudales registrados por la estación hidrométrica Batan. De manera que se evalúa la eficiencia de su aplicación.

Por un lado, la calibración del modelo muestra un buen ajuste gráfico a excepción de los días cercanos al 7/3/2016, 25/3/2017 y 25/2/2019 donde se observa una sobreestimación de los caudales registrados. Cabe resaltar que, según la Tabla 2: Valores referenciales del Criterio de Nash, el valor obtenido del Criterio de Nash (64.21%) se considera como un ajuste muy bueno. Asimismo, se aprecia una buena correlación entre los caudales observados y los caudales generados por el modelo, debido a que el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.6599$) es cercano a 1.

Por otro lado, la validación del modelo muestra un adecuado ajuste, ya que los caudales calculados se adaptan al comportamiento de la curva de caudales observados a excepción de la sobreestimación de los registrados durante los días cercanos al 2/4/2008, 22/2/2009 y 18/3/2012 y 22/3/2015. Cabe resaltar que, según la Tabla 2, valor obtenido del Criterio de Nash (48.4%) se considera como un ajuste satisfactorio. Además, se considera que la correlación entre los caudales registrados y los estimados por el modelo es casi

aceptable, debido a que el valor del coeficiente de determinación es 0.5229. Sin embargo, el valor es menor al obtenido en la etapa de calibración.

CONCLUSIONES.

El presente trabajo de investigación permitió evaluar el desempeño de la simulación de caudales diarios utilizando el modelo hidrológico GR4j en una cuenca del río Zaña hasta la estación Batan. De acuerdo a ello, se concluyó lo siguiente:

- Con respecto a la recopilación de información, el uso de la plataforma GGE fue útil y accesible para la obtención de datos hidrometeorológicos.
- Con respecto al modelo GR4j, se aplicó adecuadamente para la estimación de los caudales diarios en la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batan dando como resultado una representación satisfactoria de la serie de caudales diarios. Asimismo, nos permite reconstruir registros históricos pasados usando los datos grillados de precipitación y temperatura ERA5 para el periodo 1979 – 2020.
- Los valores del criterio de eficiencia de Nash para la calibración y validación son 64.21% y 48.4% respectivamente. Ambos valores están dentro de un rango aceptable demostrando que el modelo se ajustó adecuadamente.
- Los valores del criterio de Bilan para la calibración y validación son 96.4% y 86.2% respectivamente, lo que muestra el desempeño óptimo del modelo.
- El modelo es sencillo de aplicar en comparación con otros modelos hidrológicos, los cuales presentan complicaciones para la obtención de todas las variables y parámetros necesarios para su aplicación. Asimismo, muestra apropiadamente las dimensiones y la variabilidad de caudales eficientemente, a pesar de que solo emplea 4 parámetros.

Finalmente, los resultados obtenidos durante la aplicación del modelo hidrológico GR4j permitirán la simulación de caudales en sectores dentro de la misma cuenca o en otras cuencas que posean características geomorfológicas y climáticas parecidas para futuros trabajos de investigación. De manera que, se logrará reconstruir información de caudales diarios en lugares donde existe muy poca.

REFERENCIAS

- [1] Agencia Peruana de noticias Andina (2017). La crecida del río Zaña preocupa a las autoridades de Lambayeque. Editora Perú <https://andina.pe/agencia/noticia-la-crecida-del-rio-zana-preocupa-a-las-autoridades-lambayeque-652105.aspx>
- [2] Autoridad Nacional del Agua (2010). Evaluación de recursos hídricos cuenca del río Zaña. Ministerio de Agricultura. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2289>
- [3] Carvajal, L. F., & Roldán, E. (2007). Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del río Aburrá. *Dyna*, 74(152), 73-87. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n152/a07v74n152.pdf>
- [4] Lujano, E., Sosa, JD, Lujano, R., & 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. *Revista Ingeniería Uc* , 27 (2), 189-199. <https://www.redalyc.org/journal/707/70764230007/html/>
- [5] ECMWF / Copernicus Climate Change Service (2021). ERA5 Daily Aggregates. Latest Climate Reanalysis Produced by ECMWF/ Copernicus Climate. Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY
- [6] Carmona A. (2021). Code Google Earth Engine. <https://code.earthengine.google.com/ce29e6d1d05079dfac0063043b3be4c5>
- [7] Autoridad Nacional del Agua (2021). Observatorio del Agua. Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>
- [8] Ramos López, B. (2018). ¿Qué es Google Earth Engine?. *Cursos Gis.com*. <https://www.cursosgis.com/que-es-google-earth-engine/>
- [9] Carmona Arteaga, A. (2019). Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada pisco para las cuencas del río Biabo. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4214>
- [10] Friswell, M., & Mottershead, J. E. (1995). Finite element model updating in structural dynamics (Vol. 38). Springer Science & Business Media.
- [11] Sarria F. y Palazón J. (2008). Modelación de Sistemas Ambientales Modelos y Modelización. Universidad de Murcia. España: ocw-publicaciones.
- [12] Sarria F. y Palazón J. (2004). Software Libre para SIG. Tecnologías de la Información Geográfica: Territorio y Medio Ambiente. Murcia: Universidad de Murcia. <https://www.um.es/geograf/sigmur/cursos/cursoGRASS.pdf>
- [13] Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- [14] Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2020). Google Earth Engine (GEE): Una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones geográficas*, (101). <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- [15] Google Earth Engine (2021). code.earthengine. [En línea]. Available: <https://code.earthengine.google.com/>.