

Daily flow generation using the GR4j Method and ERA5 gridded climatic information in the Huaura basin up to the Alco - Sayán station

Subauste-Giribaldi Fátima Nicole, Vílchez-Valverde Jesús Manuel, Campos-Vasquez Neicer, Maestro en Ciencias Económicas, Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos
Universidad Privada del Norte, Perú, n00204827@upn.pe, n00228537@upn.pe, neicer.campos@upn.edu.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Abstract– The present investigation has been carried out in the hydrographic basin of the Huaura river, which aims to generate daily flows. Variables such as basin area, mean rainfall, effective rainfall, evapotranspiration and daily averages of flow rates have been used. The methodology used was the application of the GR4j method. This model is considered parsimonious because it has only 4 parameters. The validity and susceptibility of the variables studied has been corroborated. Furthermore, the influence of the factors in the variation of the result must be evaluated. It was determined that the results are acceptable for obtaining daily flows in the Huaura river basin.

Keywords: Huaura Basin, GR4j, ERA5, Daily flows.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.319>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Generación de caudales diarios usando el Método GR4j y la información climática grillada ERA5 en la cuenca Huaura hasta la estación Alco – Sayán

Subauste-Giribaldi Fátima Nicole, Vílchez-Valverde Jesús Manuel, Campos-Vasquez Neicer, Maestro en Ciencias Económicas, Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos
Universidad Privada del Norte, Perú, n00204827@upn.pe, n00228537@upn.pe, neicer.campos@upn.edu.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Resumen- La presente investigación se ha llevado a cabo en la cuenca hidrográfica del río Huaura, que tiene como objetivo la generación de caudales diarios. Se ha utilizado las variables como: área de la cuenca, la precipitación diaria, evapotranspiración y los promedios diarios de los caudales. La metodología empleada fue la aplicación del método GR4j, a este modelo se le considera parsimonioso debido a que solo tiene 4 parámetros. Se ha corroborado la validez y susceptibilidad de las variables estudiadas. Del mismo modo se tiene que evaluar la influencia de los factores en la variación del resultado. Se determinó que los resultados son aceptables para la obtención de caudales diarios en la cuenca del río Huaura.

Palabras clave: Cuenca Huaura, GR4j, ERA5, Caudales diarios.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en el Perú se han venido elaborando cada vez más proyectos que necesitan de la ingeniería en recursos hídricos, para ello se necesita información meteorología o hidrométrica de larga data en el tiempo en las cuencas que se van a estudiar para este fin. Esto ayudara a poder tener el desarrollo de un proyecto que cumpla con estándares de seguridad y calidad, es decir un proyecto óptimo, eficiente e innovador que ayude a la población a mejorar su calidad de vida.

La problemática para el desarrollo de estos proyectos es la carencia registros hidrométricos y meteorológicos actualizados en las cuencas a estudiar o la inexistencia de estos, con el pasar de los años esta carencia de datos acarrea un enorme retraso en los estudios para la ejecución de proyectos hidráulicos.

Uno de estos casos es el que viene aconteciendo en la parte media de la cuenca del río Huaura hasta la comunidad distrital de Sayán, la cual cuenta con zonas aptas para la agricultura; lamentablemente muchos de estos lugares no pueden ser aprovechados en su totalidad para el cultivo, ya que no se cuentan con proyectos de irrigación a causa del desconocimiento de la variabilidad del caudal a paso diario [1].

Recientemente se vienen usando modelos de precipitación escorrentía que usan información climática satelital con disponibilidad abierta a través de diferentes plataformas como es Google Earth Engine (GEE) [2]. Por esta razón se tiene

como objetivo la generación de caudales diarios con el método GR4j, que en francés significa Génie Rural à 4 paramètres Journalier, en la cuenca hidrográfica del río Huaura hasta la estación Alco – Sayán. Para este fin se utilizó las variables climáticas de precipitación y temperatura diaria y los caudales diarios observados, para una simulación de 25 años (1990-2015), así mismo para poder realizarla, se hizo la calibración y validación del modelo teniendo en cuenta un periodo de 2 años.

Área de Estudio: La cuenca hidrográfica del río Huaura, perteneciente a Vertiente del Pacífico, se ubica al norte del departamento de Lima y forma parte de las provincias de Huaral, Huaura y Oyón, comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas WGS84: Latitud 10°24'5.03", Longitud: 77° 38' 19.66", y Latitud: 11°15'21.16", Longitud: 76°32'14.78". El cauce principal del río Huaura tiene una longitud aproximada de 156 km. Su régimen es irregular y tormentoso. La medida convencional anual del caudal es de 27,12 m³/s. La cuenca completa tiene una extensión de unos 4333.93km² aproximadamente. Asimismo, para el presente estudio se utilizó la estación hidrológica Alco - Sayán, ubicada en las coordenadas geográficas: Latitud: 11°8'5", Longitud: 77°11'54" y a una altitud de 650 msnm, para la delimitación de la cuenca de la cual obtendremos los caudales medios diarios.

Data morfológica de la cuenca y meteorológica

Para la obtención de la data morfológica se usó el siguiente Software:

ArcGIS- Es un software completo que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica [3]. Para el presente trabajo se usó este software para la delimitación de la subcuenca del río Huaura teniendo como punto principal la estación hidrológica Alco - Sayán, generándose un archivo shapefile que fue usado en el código de GEE para la obtención de los datos meteorológicos. En la cual se obtuvo el área de la cuenca denominada “cuenca Alco - Sayán” como lo muestra la Figura 2, teniendo un área de 2862.17 km². La elaboración de estos mapas se hizo usando las cartas nacionales al 1:100 000 del IGN 22h, 23h, 22i, 23i, 21j, 22j y 23j.

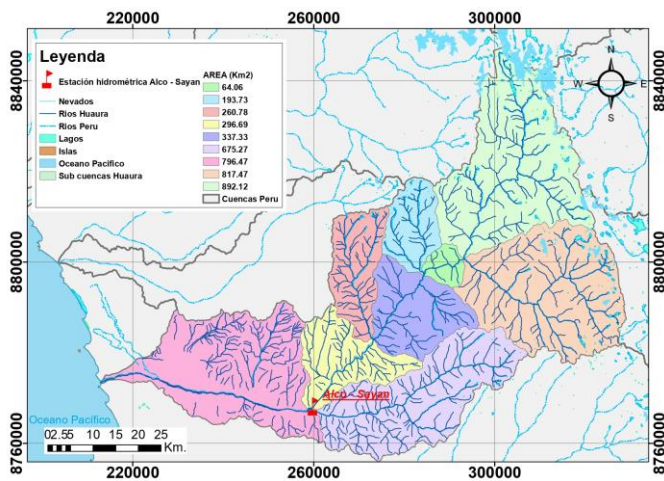


Figura 1: Cuenca e Inter cuencas hidrográficas del río Huaura.
Fuente: Elaboración propia.

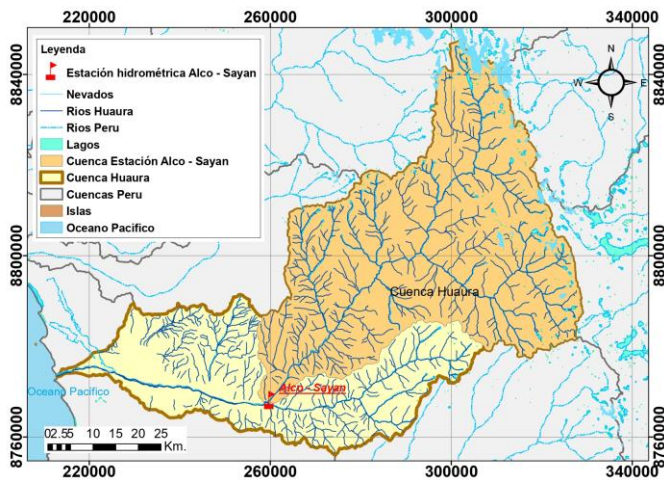


Figura 2: Cuenca total y cuenca Alco - Sayán del río Huaura delimitada con ArcGIS.
Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de la data meteorológica, precipitación y temperatura medias, se usaron las siguientes plataformas:

Google Earth Engine (GEE)- Es una plataforma de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes multiespectrales y registros climáticos recopilados por satélites que orbitan nuestro planeta. A través esta base de datos, específicamente usando los datos climáticos grillados ECMWF/ERA5/DAILY [5] y el script desarrollado y proporcionado por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga: <https://code.earthengine.google.com/83fce4f6cb32202e561e815f12111367> se obtuvieron los registros de precipitación y temperatura media de la cuenca en metros (m) y grados kelvin respectivamente (K). Esta información fue convertida a milímetros (mm) y a grados centígrados (°C) para cada caso. Para obtener la evapotranspiración se usó el método de Malmstrom ya que es un método simple que solo usa

valores de temperatura media.

Método Malmstrom

El método utiliza la presión de vapor a saturación (e_s) para estimar la evapotranspiración potencial [4]. A continuación, se presenta la expresión:

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

Donde e_s está dada por:

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

T_m – Temperatura media mensual en °C

e – Número de Euler

Autoridad Nacional del Agua (ANA)- Es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego que se encarga de realizar las acciones necesarias para el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas [6]. Los caudales promedios diarios observados de la Estación Alco - Sayán entre los años 2001-2009, fueron obtenidos mediante su plataforma web: <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>. Cabe mencionar que para la calibración del método GR4j se usó la data en un periodo de tiempo donde la medición era continua (días consecutivos) generándose un periodo de análisis para la calibración entre el 01/09/2001 al 31/01/2004 y para la validación entre 01/04/2004 al 31/08/2006.

Descripción del modelo GR4j:

Modelos GR: Los modelos GR son un grupo de modelos precipitación- escorrentía desarrollados en Francia por la unidad de investigación en hidrología del Cemagref d'Antony. Estos modelos se caracterizan por utilizar como datos de ingreso la precipitación y la temperatura. Desde 1983, año en que se propuso este modelo de forma global para reconstruir los caudales diarios, el modelo GR ha evolucionado presentando diferentes versiones como el GR1A, para caudales anuales; GR2m, para caudales mensuales; GR3j y GR4j, para caudales diarios [7].

Modelo GR4j: Es uno de los modelos más simples y con la capacidad de simular el proceso de precipitación - escorrentía en el paso del tiempo diario. Este modelo ha sido utilizado como en la simulación secuencial de la humedad del suelo y los datos del flujo en modelos conceptuales de precipitación-

El modelo GR4j toma la precipitación diaria del área y la evapotranspiración como entrada y la escurriencia diaria como salida. Así mismo utiliza el coeficiente de Nash - Sutcliffe como la función objetivo en la fase de calibración. En el modelo la precipitación y la evapotranspiración potencial se denotan como P y E respectivamente [8]. P se calcula mediante el método de interpolación espacial, usando los registros de las estaciones más cercanas a la cuenca de estudio. E puede ser un valor promedio diario de largo plazo. Cabe resaltar que todas las cantidades, bien sean entradas, salidas o variables internas están expresadas en mm/día, por tal motivo, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea necesario. En la figura 3 se muestra la descripción grafica del modelo lluvia- escurriencia para el método GR4j.

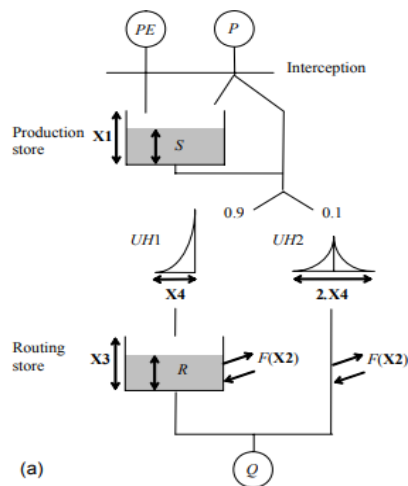


Figura 3: Esquema de la estructura del modelo GR4j.
Fuente: [10]

Tabla 1: Parámetros usados en el modelo GR4j.

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
x_1 (mm)	Capacidad máxima del tanque de producción.
x_2 (mm)	Coefficiente de intercambio de aguas subterráneas.
x_3 (mm)	Capacidad máxima para el tránsito en canales.
x_4 (días)	Tiempo base del hidrograma unitario UH1.

Fuente: Rincón Achury, L. V. (2019).

Descripción matemática del modelo GR4j:

Determinación de la precipitación y evapotranspiración

Si $P \geq E$ entonces $P_n = P - E$ y $E_n = 0$ (4)

Ecuación Precipitación neta

Si $P < E$ entonces $P_n = 0$ y $E_n = E - P$ (5)

Ecuación despeje precipitación neta

Almacenamiento de producción: En el caso en que P_n no sea cero, una parte P_s de P_n , entra al tanque de producción:

$$P_s = \frac{x_1 \left[1 - \left(\frac{S_1}{x_1} \right)^2 \right] \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \left(\frac{S_1}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (6)$$

Ecuación de Almacenamiento de producción.

P_s es determinada como una función del nivel S en el tanque, donde x_1 (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción. Cuando E_n no es cero, una tasa real de evaporación es determinada como una función del nivel en el almacenamiento de producción con el fin de calcular la cantidad E_s de agua que se evaporará del tanque.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 + \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)} \quad (7)$$

Ecuación Tasa real de evaporación

De esta forma, el contenido de agua en el tanque de producción se actualiza como:

$$S = S - E_{\epsilon} + P_{\epsilon} \quad (8)$$

Ecuación Cantidad de agua corregida

Es importante resaltar que S nunca puede exceder a x_1 . Una cantidad P_{erc} se escapa como percolación del almacenamiento de producción. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$P_{erc} = S \left[1 - \left(1 + \left(\frac{4S}{9x_1} \right) \right)^1 \right]^{-0.25} \quad (9)$$

Ecuación Percolación en el tanque de Producción.

De la expresión anterior se concluye que la percolación no contribuye mucho al caudal por esta razón es importante principalmente para la simulación de eventos mínimos. El valor de percolación es siempre menor que S . El nuevo nivel en el tanque queda definido como:

$$S = S - P_{erc} \quad (10)$$

Ecuación Valor de Percolación

Distribución lineal con hidrogramas unitarios. La cantidad total de agua P_r que alcanza las funciones de distribución esta dada por:

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s) \quad (11)$$

Ecuación cantidad total de agua

El valor del P_r se divide en dos componentes de flujo: el 90% de P_r se distribuye por medio de una hidrógrafa unitaria UH1 y luego por un tanque de distribución no lineal. El 10% restante de P_r es distribuido por medio de una hidrógrafa unitaria UH2. Con UH1 y UH2, se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las ordenadas de ambas hidrógrafas son usadas en el modelo para distribuir la lluvia efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos. UH1 y UH2 dependen del mismo parámetro x_4 expresado en días, sin embargo, UH1 tiene un tiempo base de x_4 días, mientras que UH2 tiene un tiempo base de $2x_4$ días. El parámetro x_4 puede tomar valores reales y debe ser mayor de 0.5 días. En su forma discreta, las hidrógrafas unitarias UH1 y UH2 tienen n y m ordenadas respectivamente, donde n y m son los enteros más pequeños que exceden x_4 y $2x_4$ respectivamente. Las ordenadas de ambas hidrógrafas se derivan de las curvas-S correspondientes (proporción acumulada de la entrada con el tiempo) denotadas por SH1 y SH2 respectivamente. SH1 está definida a lo largo del intervalo de tiempo t de la siguiente forma:

$$\text{Para } t \leq x_4, SH1(t) = 0 \quad (12)$$

Ecuación Proporción acumulada de la entrada Vs tiempo

$$\text{Para } 0 < t < x_4, SH1(t) = (t/x_4)^{5/2}$$

$$\text{Para } t \geq x_4, SH1(t) = 1$$

Ecuación Cálculo SH1 vs tiempo (13)

SH2 es definida de una manera similar:

$$\text{Para } t \leq 2x_4, SH2(t) = 0$$

$$\text{Para } 0 < t < 2x_4, SH2(t) = (t/2x_4)^{5/2}$$

$$\text{Para } 2x_4 < t < 4x_4, SH2(t) = 1 - 1/2 (t/2x_4)^{5/2}$$

$$\text{Para } t \geq 4x_4, SH2(t) = 1$$

Ecuación Cálculo SH2 vs tiempo (14)

Finalmente, las ordenadas de UH1 y UH2 se calculan como: Donde j es un entero.

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (15)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (16)$$

Intercambio de agua en la cuenca. Posteriormente se calcula un término F que actúa en ambas componentes de flujo, el cual indica el intercambio de agua subterránea:

$$F = x_3 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \quad (17)$$

Ecuación de Intercambio de agua en la Cuenca

R es el nivel en el tanque de distribución, x_3 es la capacidad de referencia y x_2 es el coeficiente de intercambio. El parámetro x_2 puede ser positivo en el caso en que se importa agua, negativo en el caso en que hay pérdidas, o cero cuando no hay intercambio de agua. Entre más alto el nivel en el tanque de distribución mayor es el intercambio. En valor absoluto, F no puede ser mayor que x_2 , puesto que el coeficiente de intercambio representa la máxima cantidad de agua que puede ser adicionada (o liberada) a (de) cada componente de flujo, cuando el nivel en el tanque de distribución es igual a x_3 .

Almacenamiento de distribución no lineal. El valor de R se actualiza adicionando el término F y la salida Q_r proveniente de UH1.

$$R = \text{Max}(0; R + Q_r + F) \quad (18)$$

Ecuación Almacenamiento de distribución no lineal

Entonces el caudal de salida del tanque, Q_r , se calcula como:

$$Q_r = R \left[1 - \left(1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right)^{0.25} \right] \quad (19)$$

Ecuación Caudal de salida del tanque

Q_r siempre será menor que R . El nuevo nivel en el almacenamiento es:

$$R = R - Q_r \quad (20)$$

Ecuación Nivel de almacenamiento del tanque

Aunque al comienzo de un intervalo de tiempo el tanque puede recibir una cantidad de agua mayor que el déficit de saturación $x_3 - R$, el nivel en el tanque nunca puede exceder

la capacidad x_3 al final del intervalo de tiempo. Por esta razón, la capacidad x_3 es llamada la capacidad máxima diaria.

Este tanque de distribución está en la capacidad de simular recesiones cuando sea necesario.

- *Cálculo del caudal total.* La salida Q_1 proveniente de UH2, también está sujeta al intercambio de agua F , de esta forma la componente Q_d queda definida de la siguiente forma:

$$Q_d = \text{Max}(0; Q_1 + F) \quad (21)$$

Ecuación Caudal total

Finalmente, el caudal total se calcula como:

$$Q = Q_r + Q_d \quad (22)$$

II. MÉTODOS

Metodología de calibración del modelo GR4j- Recopilada la información de precipitación media, temperatura media y caudales promedio, para el periodo comprendido entre 01/09/2001 y el 31/01/2004 (883 días), se procede primero a calcular la Evotranspiración potencial (ETP) usando la Ecuación Malmstrom. Después se inicia con la simulación de los caudales diarios en la estación con la que se delimitó la cuenca de estudio, para ello la programación del modelo GR4j se realizó en Excel [9]. La fase de calibración permite obtener los parámetros del modelo óptimos para la serie simulada representándose con precisión en la eficiencia Nash y la correlación entre los datos obtenidos y observados. Con el fin de tener resultados óptimos en el modelo GR4j, se utilizó la herramienta Solver del software Excel para obtener el conjunto de parámetros x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , para los cuales los criterios de eficiencia Nash son máximos.

Metodología de validación del modelo GR4j- De igual manera que para la calibración, una vez recopilada la información de precipitación media, temperatura media y caudales promedio, en este caso para el periodo comprendido entre 01/04/2004 y el 31/08/2006 (883 días), se procede primero a calcular la Evotranspiración potencial (ETP) usando la Ecuación Malmstrom. Luego se inicia con la simulación de los caudales diarios en la estación usada para la delimitación de la cuenca de estudio, usando el mismo formato Excel [9]. Para este punto fueron usados los parámetros obtenidos en la fase de calibración para conseguir la comparación de los resultados obtenidos con el modelo y lo observado por el ANA, teniendo en cuenta la eficiencia Nash y la correlación entre los resultados.

Medidas de bondad de ajuste - Eficiencia NASH- Como ya se mencionó para estimar la veracidad o bondad del ajuste de la calibración y validación se utilizó el criterio de eficiencia Nash que es uno de los más usados en hidrología.

Tabla 2: Valores referenciales de NASH.

NASH	AJUST E
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011)

Los valores que se muestran en la tabla para efecto de este trabajo fueron multiplicados por 100 para obtenerlos en porcentaje.

Coefficiente de correlación- El coeficiente de correlación (R^2) expresa la dependencia lineal entre dos variables, para este estudio se refiere a los caudales observados y los caudales simulados.

III. RESULTADOS

Calibración- El área de la cuenca (km^2) es la perteneciente a la delimitación de la subcuenca que tiene como punto guía la Estación Alco - Sayán obteniéndose un área de 2862.17 km^2 . Y el periodo de análisis es de 883 días comprendido entre 01/09/2001 y el 31/01/2004.

Tabla 3: Parámetros del modelo GR4j en la cuenca calibrada

Parámetros del modelo	Transferencia
x_1 : Capacidad res. producción (mm)	7.448
x_2 : Parámetro de intercambio (mm)	-4.462
x_3 : Capacidad res. enrutamiento (mm)	5.584
x_4 : Retraso (días)	-13.623

Tabla 4: Valores iniciales para la cuenca calibrada

Tasa de llenado inicial $S0/x_1$	0.6
Tasa de llenado inicial $R0/x_3$	0.7

Tabla 5: Criterios de eficiencia de la calibración del modelo

Nash(Q)	88.0
---------	------

Nash(VQ)	88.9
Nash(ln(Q))	86.7
Bilan	99.0

En la figura 4, se puede apreciar la comparación de los caudales registrados en la estación hidrométrica Alco - Sayán y los caudales generados usando el método GR4j entre los días 1/9/2001 al 31/1/2004, el cual corresponde al periodo de calibración. Así mismo la figura 5 se muestra la excelente correlación $R^2 = 0.856$ que existen entre los caudales registrados y los caudales generados.

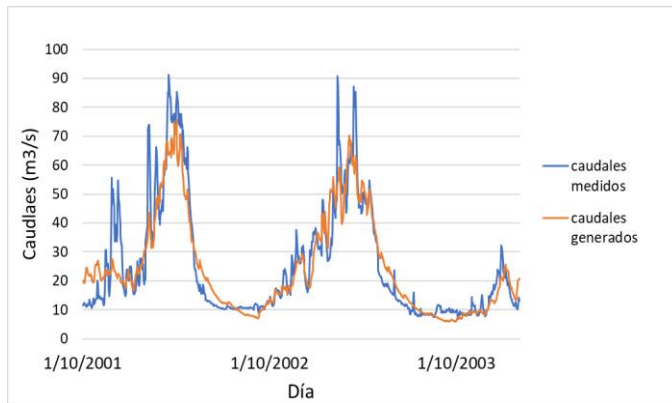


Figura 4: Comparativa de caudales medidos (ANA) y los generados con el modelo GR4j usando datos grillados ERA5 para el periodo 1/9/2001 al 31/1/2004. **Fuente:** Elaboración propia

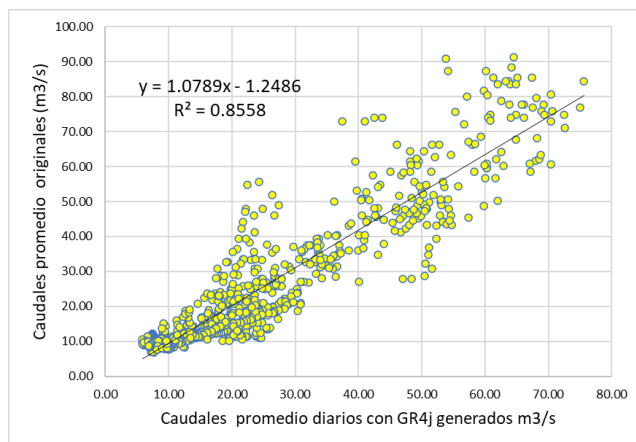


Figura 5: Correlación R^2 entre los caudales generados de datos diarios (m^3/s) y caudales registrados promedio diarios (m^3/s) observados para el periodo de calibración. **Fuente:** Elaboración propia

Validación- En este punto como ya se mencionó en la metodología se usó los parámetros obtenidos en la calibración para verificar si los parámetros calculados con el Excel se ajustan a los datos observados en otro periodo de tiempo por la estación Alco - Sayán, el periodo de análisis fue de 883 días comprendido entre 01/04/2004 y el 31/08/2006. El área de la

cuenca Alco - Sayán en (km^2) se mantiene igual (2862.17 km^2).

Tabla 6: Parámetros del modelo GR4j usados para validar los datos de la cuenca Alco - Sayán

Parámetros del modelo	Transferencia
x_1 : Capacidad res. producción (mm)	2.01
x_2 : Parámetro de intercambio (mm)	-5.98
x_3 : Capacidad res. enrutamiento (mm)	7.42
x_4 : Retraso (días)	-13.62

Tabla 7: Valores iniciales para la cuenca Alco - Sayán

Valores iniciales	
Tasa de llenado inicial $S0/x1$	0.6
Tasa de llenado inicial $R0/x3$	0.7

Tabla 8: Criterios de eficiencia para la validación del modelo

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	61.4
Nash(VQ)	74.0
Nash(ln(Q))	76.3
Bilan	106.0

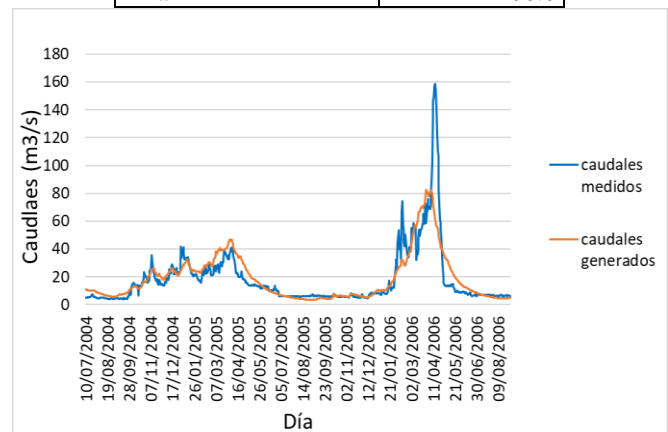


Figura 6: Comparativa de caudales medidos (ANA) y los generados con el modelo GR4j usando datos grillados ERA5 para el periodo 1/4/2004 al 31/8/2006. **Fuente:** Elaboración propia.

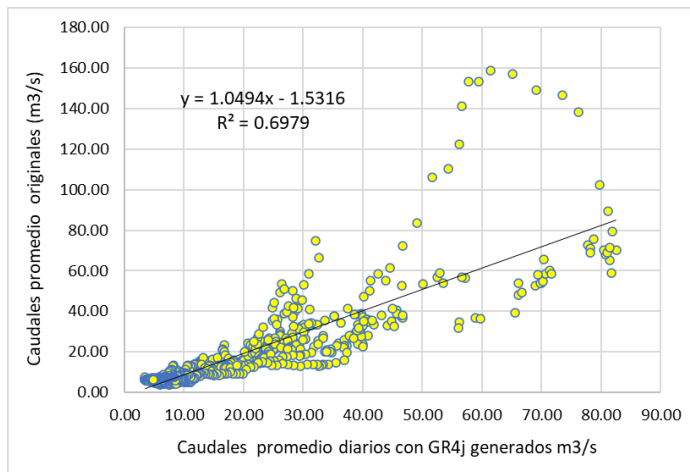


Figura 7: Correlación R^2 entre los caudales generados de datos diarios (m^3/s) y caudales registrados promedio diarios (m^3/s) observados para el periodo de validación **Fuente:** Elaboración propia

Análisis de resultados:

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la parte de calibración, al ejecutar el Solver del Excel, los parámetros obtenidos dan un criterio de eficiencia de R^2 por encima del 80% lo que significa el modelo GR4j se acopla muy bien al área estudiada de la cuenca Alco - Sayán. Asimismo, en la Figura 5 la curva donde se muestra la correlación entre los caudales observados y generados el R^2 está en un valor de 0.855, al estar tan próximo al 1, da a entender que los datos tienen buena similitud. Por último, se compararon las curvas de caudales en la Figura 4 a lo largo del periodo de análisis, se puede ver que las curvas se asemejan mucho teniendo en la parte de los caudales observados algunos picos que podría deberse a datos atípicos como son lluvias esporádicas, aumento del caudal por el agua saliente de la infiltración u otros factores como obras humanas.

En el caso de la validación, al usarse los mismos parámetros obtenidos en la calibración, en primer lugar, se observa que el criterio de eficiencia NASH está por encima del 60% dando a entender que el modelo sigue funcionando bien para la cuenca Alco - Sayán. Pero al revisarse la Figura 7 donde se muestra la línea de tendencia de la correlación entre los caudales observados y generados, se aprecia que el R^2 está en un valor de 0.69 lo que da entender que los datos son buenos. Además, en la Figura 6 al compararse las curvas de caudales a lo largo del periodo de análisis, se puede ver que las curvas se asemejan teniendo en la parte de los caudales observados algunos picos inferiores y superiores a los de los caudales generados y como se mencionó anteriormente esto podría deberse a datos atípicos en algún tramo de la cuenca Alco - Sayán.

De esta manera, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en la calibración y validación son muy buenos según los criterios de NASH, están por encima del 60%, y en

las figuras 5 y 7 (correlación), se muestra un R^2 por encima del 0.8 y cercano a 1 para la calibración y un R^2 próximo a 0.7 para la validación. Con esto se puede decir que el método funciona para el área de la cuenca hasta la estación Alco - Sayán, por ello se procede a realizar la simulación de caudales diarios para el periodo propuesto obteniéndose la Figura 8 y comparando con los datos observados en los periodos analizados. Para esto se usaron los valores x_1 , x_2 , x_3 , x_4 de la calibración.

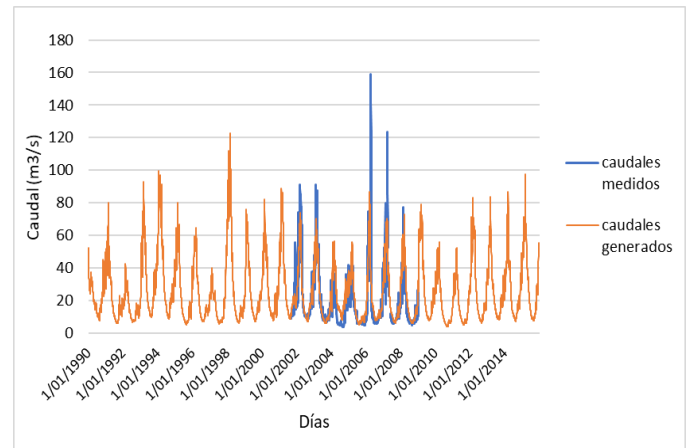


Figura 8: Caudales generados con el método GR4j, periodo 1990-2015 **Fuente:** Elaboración propia

Al ver la figura 8 se puede decir que, aunque existen datos atípicos entre los días 9/4/2006 al 22/4/2006 y el 2/4/2007, las curvas de ambos caudales, tanto los observados como los generados, son semejantes y los caudales diarios generados con el método GR4j, proporcionan la información para poder generar caudales diarios desde el 1/01/1990 al 31/12/2015, periodo en el cual ERA5 DAILY proporciona datos grillados climatológicos, a su vez que esto puede servir para estudios futuros que requieran esta data faltante por la escasez de estaciones de medición permanente monitoreo.

IV. CONCLUSIONES

Se puede concluir que utilizando el método GR4j y corroborando la validez y susceptibilidad de las variables, se logró determinar que se obtuvieron resultados aceptables para la obtención de caudales diarios en la cuenca Alco - Sayán, los resultados de los valores de eficiencia que se obtuvieron se encuentran entre un 61% a un 100% lo que muestra el potencial del modelo a la hora de calibrar y la eficiencia que posee. Los caudales generados a través de este método pueden ser usados para generación de caudales en periodos amplios y así ser utilizado en la planificación de proyectos diversos hidráulicos como la construcción de canales de irrigación para las tierras agrícolas ubicadas en el valle, específicamente en la parte baja del río Huaura, teniendo en cuenta que la estación Alco - Sayán es el punto gráficamente hablando que divide la

zona baja y la zona alta del cauce principal del río Huaura.

Asimismo, debido a la facilidad del GR4j que utiliza cuatro variables principales y por su aproximación este estudio puede ser base para otros estudios más enfocados a lugares o sub cuencas obteniendo resultados más precisos debido a los años estudiados en la cuenta, y así lograr un modelo más exacto que ayuden a completar algunos datos que no se tienen estudiados o analizados con procesos de aproximación.

Finalmente, los caudales diarios generados en este estudio no podrán ser usados para calcular los caudales de máximas avenidas a diferentes tiempos de retorno, esto debido a que no representan bien los caudales atípicos como se mostró en los periodos de validación y calibración, ya que es un modelo que solo usa variables de precipitación y temperatura en su algoritmo y no considera otras variables importantes como la infiltración y los valores morfológicos de la cuenca.

REFERENCES

- [1] Autoridad Nacional de Agua. (26 de febrero de 2018). Más de cinco mil usuarios de la cuenca Huaura se benefician con entrega de licencia de uso de agua. <http://www.ana.gob.pe/noticia/mas-de-cinco-mil-usuarios-de-la-cuenca-huaura-se-benefician-con-entrega-de-licencia-de-uso>
- [2] Aveiga Lovato, Henry Fabricio y Caiza Críollo, Henry Agustín (2018). Análisis comparativo de resultados hidrológicos obtenidos con los modelos HEC-HMS, GR4J, AWBM y TANK MODEL, en la cuenca del río Alambi. Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil. Carrera de Ingeniería Civil. Quito: UCE. 213 p. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14509>
- [3] Ruiz Pérez, I. M., Sarmiento Navarro, E. D. J., & Babilonia Franco, K. J. (2020). Visor geográfico de indicadores para el desarrollo territorial del área Metropolitana de Barranquilla. https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/4183/Rui_z_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4] A. Carmona Arteaga, “Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada para cuencas del río Biabo”, *Escuela de Posgrado. Universidad Nacional Agraria*, 2019. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4214>
- [5] Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), (date of access). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- [6] Plataforma digital única del Estado Peruano. (nd). Autoridad Nacional de Agua. <https://www.gob.pe/institucion/ana/institucional>
- [7] Cabrera, J. (2013). Modelos agregados: GR2M. SSPP, 1, 1. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_6.pdf
- [8] Rincón Achury, L. V. (2019). Aplicación de los modelos lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la cuenca del Río Gualí para la gestión de los recursos hídricos. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16704/2019laurarin_c%C3%B3n.pdf?sequence=8&isAllowed=y
- [9] 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>
- [10] Perrin, C., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas, C., Michael, C. & Mathevet, T. (2010). Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall—runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 131-151 <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1623/hysj.52.1.131>