

# Generation of daily and monthly flows using the GR4j Method and the ERA5 gridded climate information in the Pachachaca basin up to the Santa Rosa station

Alfaro-Gurrieronero Cesar David, Sovero-Gómez Shantall Valeria, Campos-Vásquez Neicer, Maestro en Ciencias Económicas, Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos  
Universidad Privada del Norte, Perú, n00182645@upn.pe, n00179881@upn.pe, neicer.campos@upn.edu.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

*Abstract– The objective sought with this research is to be able to build a series of daily flows in the Pachachaca basin to the Santa Rosa hydrometric station for a period of 30 years (1990-2020). These have been generated using rainfall and average temperature data from the ERA5 climate grid product and the flow measurement records of the Santa Rosa station for the days between the years 2019 to 2020, using the GR4j method. The simulated downloads were evaluated using statistical techniques of efficiency and error. Satisfactory results were obtained, which are shown in the calibration and validation stage of the GR4j hydrological model, obtaining in the validation a linear equation equal to  $y=0.9367x + 7.421$ ; where the variable "x" represents the average monthly flows generated with the model and the values of "y" the original average flows registered, with a coefficient  $R^2=0.8814$ ; which is not giving an efficiency value that is between 80% and 100%. Statistical evaluation also showed that the GR4j model performs very well despite using only four parameters. This finding indicates that the evaluated models can be integrated as an alternative for strengthening the daily hydrological forecast in the Antabamba river basin up to the Santa Rosa station.*

*Keywords: Pachachaca, Apurimac Basin, GR4j, ERA5, Daily flows.*

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.306>

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

# Generación de caudales diarios y mensuales usando el Método GR4j y la información climática grillada ERA5 en la cuenca Pachachaca hasta la estación Santa Rosa

Alfaro Gurrionero Cesar David, Sovero Gómez Shantall Valeria, Campos-Vásquez Neicer, Maestro en Ciencias Económicas, Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos  
Universidad Privada del Norte, Perú, n00182645@upn.pe, n00179881@upn.pe, neicer.campos@upn.edu.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

*Resumen- El objetivo que se busca con esta investigación es poder construir una serie de caudales a paso diario en la cuenca Pachachaca hasta la estación hidrométrica Santa Rosa para un periodo de 30 años (1990-2020). Estos han sido generados usando datos pluviométricos y de temperatura media del producto grillado climático ERA5 y los registros de medición de caudales de la estación Santa Rosa para los días entre los años 2019 hasta el 2020, usando el método GR4j. Las descargas simuladas fueron evaluadas mediante técnicas estadísticas de eficiencia y error. Se obtuvieron resultados satisfactorios, los cuales son mostrados en la etapa de calibración y validación del modelo hidrológicos GR4j, obteniéndose en la validación una ecuación lineal igual a  $y=0.9367x + 7.421$ ; donde la variable "x" representa los caudales promedios mensuales generados con el modelo y los valores de "y" los caudales promedio originales registrados, con un coeficiente  $R^2=0.8814$ ; lo que no está dando un valor de eficiencia que se encuentran entre un 80% a un 100%. La evaluación estadística también mostró que el modelo GR4j a pesar de utilizar solo cuatro parámetros, se desempeña muy bien. Este hallazgo indica que los modelos evaluados, puedan ser integrados como una alternativa para el fortalecimiento del pronóstico hidrológico diario en la cuenca del río Antabamba hasta la estación Santa Rosa.*

*Palabras clave: Pachachaca, Apurímac, Cuenca Apurímac, GR4j, ERA5, Caudales diarios.*

## I. INTRODUCCIÓN

En años recientes en el Perú se han desarrollado más a menudo proyectos de cómo es el caso de construcción de puentes, carreteras, obras de abastecimiento, presas, obras de protección riego ante crecidas de los ríos, etc.

El problema para desarrollar esos proyectos es la falta de estudios hidrológicos. Esta dificultad para desarrollar estos estudios muchas veces no se debe a la falta de gente capacitada para desarrollarlos, sino a la ausencia de registros hidrométricos y meteorológicos en el tiempo.

Hay que recordar que en muchos libros en Hidrología nos recomiendan en promedio alrededor de 20 años de registros de medición diaria de caudales para poder realizar estudios hidrológicos ya sea para disponibilidad hídrica o la obtención de caudales de máximas avenidas. Obtener registros para un periodo de tiempo de 20 años es un poco difícil en el Perú, ya

que son pocas las estaciones que cuentan con un periodo tan largo de tiempo.

Para suplir la necesidad de falta de registros hidrológicos, existen diferentes metodologías que, en base a variables climáticas como la precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc., permiten generar series de caudales. Para ello se necesitará muchas veces un pequeño registro de caudales en el punto a evaluar para poder calibrar el modelo precipitación – escorrentía.

El problema surge cuando en la cuenca a evaluar no se cuenta tampoco con estaciones meteorológicas de las variables mencionadas anteriormente.

Ante la falta de datos a nivel histórico y espacial, últimamente se plantea el uso de datos que han sido elaborados en base a sensores remotos de clima, como es el producto ERA5, CHIRPS, TRMM y GPM.

Hace un par de años SENAMHI ha desarrollado para Perú y Ecuador su producto grillado de precipitación, evapotranspiración y temperatura PISCO, el cual está disponible a nivel diario desde el año 1981 y 2016, y usa de datos de entrada los datos grillados de los sensores remotos mencionados y las estaciones meteorológicas disponibles [7]. Así mismo ha habido investigaciones particulares recientes como el estudio RAIN4PE, el cual dispone de registros grillados de precipitación a nivel diario entre los años 1981 al 2015 para el Perú y Ecuador. Que tiene resultados prometedores para los futuros modelos de precipitación – escorrentía.

En la investigación se ha planteado usar los datos grillados ERA5, ya que esta fuente esta disponible para valores diarios para el periodo 1979 al 2020. Esto ha permitido calibrar y validar el modelo GR4J para el periodo en común entre los años 2019 al 2020.

*Área de Estudio:* La cuenca hidrográfica del río Pachachaca, es una cuenca tributaria por la margen izquierda del río Apurímac la cual es parte de la Vertiente del Amazonas.

La cuenca del río Pachachaca se ubica dentro del departamento de Apurímac y forma parte de las provincias de

Abancay, Andahuaylas, Antibamba y Aymares, teniendo un área de 8072.69 km<sup>2</sup>.

Es comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas WGS84: Latitud 13°25'9", Longitud: 73°32'41", y Latitud: 14°47'53", Longitud: 72°35'33". El cauce principal del río Pachachaca tiene una longitud aproximada de 182 km. Su régimen es irregular y tormentoso. Asimismo, se utiliza la estación hidrométrica Santa Rosa, ubicada en las coordenadas geográficas: Latitud: 13°59'29.9", Longitud: 73°10'28.9" y a una altitud de 650 msnm, para la delimitación de la cuenca de la cual se obtendrá los caudales medios diarios. En la estación Santa Rosa, la cual es la única estación hidrométrica de la cuenca Pachachaca, se han registrado durante el 2019 al 2020 caudal en avenidas cercanos a los 200m<sup>3</sup>/s y caudales en estiaje cercanos a 30m<sup>3</sup>/s

*Reporte de Inundaciones y deslizamientos en la cuenca*

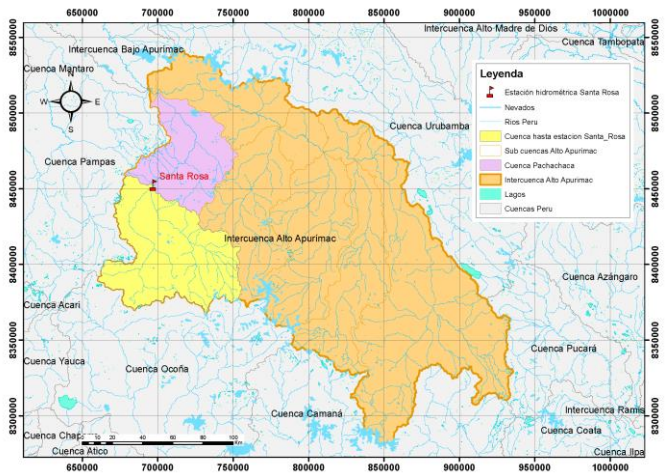
Se han reportado algunas inundaciones en la cuenca Pachachaca como lo indica el comité distrital de defensa civil de Tintay en su informe 00053355 el día 07/02/2012 donde las precipitaciones pluviales incrementaron el caudal del río Pachachaca, causando inundación y afectando a los cultivos y las defensas riverseñas, esto afecto a 90 familias y áreas de cultivo.

Otro reporte lo realizo el INGEMENT en su informe técnico 6594. Donde precisa deslizamientos en la margen izquierda del río Pachachaca

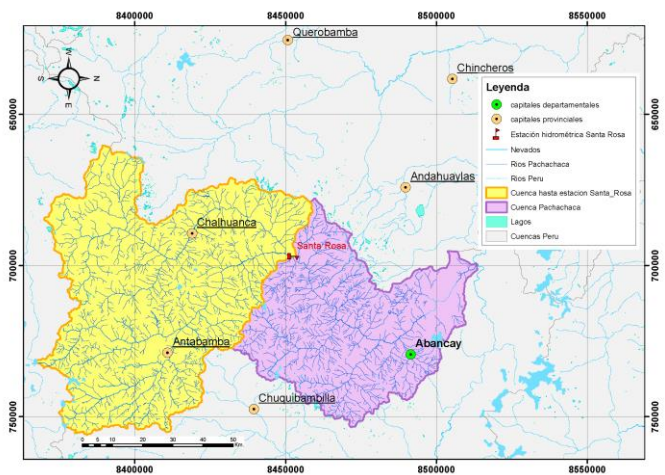
*Data morfológica de la cuenca y meteorológica*

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

*ArcGIS*- El ArcGIS es un software de Sistema de Información Geográfica más conocido por sus siglas en inglés como un GIS. Además, como un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica [1]. Para el presente trabajo se usa este software para la delimitación de la subcuenca del río Pachachaca teniendo como punto principal la estación hidrológica Santa Rosa, generándose un archivo en formato shapefile que fue cargado a la plataforma GEE (Google Earth Engine) para la obtención de los datos meteorológicos. Con El Arcgis se obtuvo el área de la cuenca de estudio la que se denominó en adelante "cuenca Santa Rosa" como lo muestra la Figura 2, teniendo un área de 4991.39km<sup>2</sup>. Para la delimitación de la cuenca Santa Rosa se realizó usando las cartas nacionales al 1:100 000 del IGN 30o, 27p, 28p, 29p, 30p, 27q, 28q, 29q y 30p



**Figura 1:** Cuencas hidrográficas del río Alto Apurímac, Pachachaca total y hasta la estación hidrométrica Santa rosa. **Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 2:** Esquema realizado en ArcGIS para la Cuenca total Pachachaca y cuenca Santa rosa del río Apurímac y capitales distritales y provinciales **Fuente:** Elaboración propia.

Se dio uso a la plataforma gratuita GEE para la obtención de la precipitación y temperatura media en la cuenca Santa Rosa.

*Google Earth Engine (GEE)*- Google Earth Engine combina un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Los científicos, investigadores y desarrolladores usan GEE para detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferencias en la superficie de la Tierra. GEE está a disponibilidad para uso comercial académico y de investigación. En el trabajo se ha usado los datos climáticos grillados ECMWF/ERA5/DAILY [3] y el código para esta plataforma desarrollado y brindado por el Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga:<https://code.earthengine.google.com/83fce4f6cb32202e561e815f12111367> con el cual se obtuvieron los registros de precipitación y temperatura media de la cuenca en metros (m) y grados kelvin respectivamente (K). Esta información fue

transformada a milímetros (mm) y a grados centígrados (°C). Para conseguir los datos de la evapotranspiración se usó el método de Malmstrom ya que es un método fácil de usar.

**Método Malmstrom**

Para estimar la evapotranspiración potencial, el método usa la presión de vapor a saturación (es), la cual está relacionada a la temperatura media [2]. Seguidamente, se muestra la expresión:

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

Donde  $e_s$  está dada por:

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

$T_m$  – Temperatura media mensual en °C

$e$  – Número de Euler

**Autoridad Nacional del Agua (ANA)**- Es el ente estatal encargado de desplegar la rectoría técnica - normativa y establecer procedimientos para la gestión integrada, sostenible y multisectorial de los recursos hídricos en beneficio de los usuarios de agua y población en general, de manera oportuna y eficaz. Por ello, mediante su plataforma web: <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/> se obtuvieron los caudales promedios diarios observados de la Estación Santa rosa entre los meses de enero del 2019 – julio del 2020. Cabe mencionar que al ser pocos datos el método GR4j se utiliza todo el periodo para la calibración.

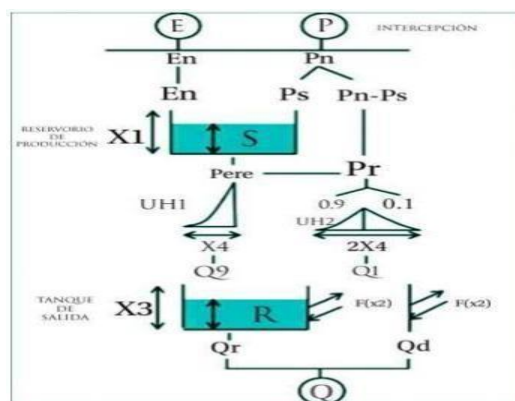
**Descripción del modelo GR4j:**

**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 [4].

**Modelo Génie Rural à 4 paramètres Journalier (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 en la simulación secuencial de la humedad del suelo y los datos del flujo en modelos conceptuales de precipitación- escorrentía obteniendo resultados muy satisfactorios, es por esto por lo que fue utilizado en el desarrollo de la investigación.

El modelo GR4j toma la precipitación diaria del área y la evapotranspiración como entrada y la escorrentía 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 [5].

$P$  se calcula mediante una interpolación espacial usando los registros de las estaciones más cercanas a la cuenca en 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- escorrentía para el método GR4j.



**Figura 3:** Esquema de la estructura del modelo GR4j. Fuente: Rincón Achury, L. V. (2019).

**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 potencial neta-** Las componentes principales del modelo incluyen: en primer lugar, el restar la evapotranspiración  $E$  de la precipitación  $P$ , se determina una precipitación neta  $P_n$  o una capacidad neta de evapotranspiración  $E_n$ .

$$\text{Si } P \geq E \text{ entonces } P_n = P - E \text{ y } E_n = 0$$

Ecuación Precipitación neta

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

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:

$$P_s = \frac{x_1 \left[ 1 - \left( \frac{S_1}{x_1} \right)^2 \right] \tanh \left( \frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \left( \frac{S_1}{x_1} \right) \tanh \left( \frac{P_n}{x_1} \right)} \dots\dots\dots (3)$$

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.

$$E_s = \frac{S \left( 2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left( \frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left( 1 + \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left( \frac{E_n}{x_1} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

Ecuación Tasa real de evaporación

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

$$S = S - E_s + P_s \dots\dots\dots (5)$$

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:

$$P_{erc} = S \left[ 1 - \left( 1 + \left( \frac{4S}{9x_1} \right) \right)^1 \right]^{-0.25} \dots\dots\dots (6)$$

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:

$$S = S - P_{erc} \dots\dots\dots (7)$$

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:

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s) \dots\dots\dots (8)$$

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:

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

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 Calculo SH1 vs tiempo

SH2 es definida de una manera similar:

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

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

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

$$\text{Para } t \geq 2x_4, SH2(t) = 1$$

Ecuación Calculo SH2 vs tiempo

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

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \dots\dots\dots (9)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \dots\dots\dots (10)$$

*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:

$$F = x_3 \left( \frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \dots\dots\dots (11)$$

*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  $Q_9$  proveniente de UH1.

$$R = \text{Max}(0; R + Q_9 + F) \dots\dots\dots (12)$$

*Ecuación Almacenamiento de distribución no lineal*

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

$$Q_r = R \left[ 1 - \left( 1 + \left( \frac{R}{x_3} \right)^4 \right)^{0.25} \right] \dots\dots\dots (13)$$

*Ecuación Caudal de salida del tanque*

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

$$R = R - Q_r \dots\dots\dots (14)$$

*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:

$$Q_d = \text{Max}(0; Q_1 + F) \dots\dots\dots (15)$$

*Ecuación Caudal total*

Finalmente, el caudal total se calcula como:

$$Q = Q_r + Q_d \dots\dots\dots (16)$$

El objetivo que se busca con la investigación es poder construir una serie de caudales a paso diario en la cuenca Pachachaca hasta la estación hidrométrica Santa Rosa para un periodo de 30 años (1990-2020). Esto permitirá a través de los resultados generar conocimiento beneficioso para futuros proyectos dentro de la zona afectada o ser base para otros estudios.

## II. MÉTODOS

*Metodología de calibración del modelo GR4j-* Recopilada la información de precipitación media, temperatura media y caudales promedio, para el periodo comprendido entre 1/1/2019 y el 30/08/2019 (241 días), se procede primero al cálculo de la Evotranspiración potencial (ETP) usando la Ecuación Malmstrom. Después se inicia con la simulación de los caudales diarios en la estación con la que delimitamos la cuenca de estudio, para ello la programación del modelo GR4j se realizó en Excel [6]. 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 1/1/2019 y el 8/7/2020 (552 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 con la que delimitamos la cuenca de

estudio, usando el mismo formato Excel (Perrin, 2006). Para este punto se usarán los parámetros obtenidos en la fase de calibración para obtener la comparación de lo obtenido 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	AJUSTE
< 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 nos referimos 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 Santa Rosa obteniéndose un área de  $4991.39km^2$ . Y el periodo de análisis es de 241 días comprendido entre 1/1/2019 y el 30/08/2019. Con un periodo de prueba de 40 días.

**Tabla 2:** Parámetros del modelo GR4j en la cuenca calibrada

Parámetros del modelo	Transferencia
$X_1$ : Capacidad res. producción (mm)	7.74
$X_2$ : Parámetro de intercambio (mm)	-3.32
$X_3$ : Capacidad res. enrutamiento (mm)	4.69
$X_4$ : Retraso (días)	-13.62

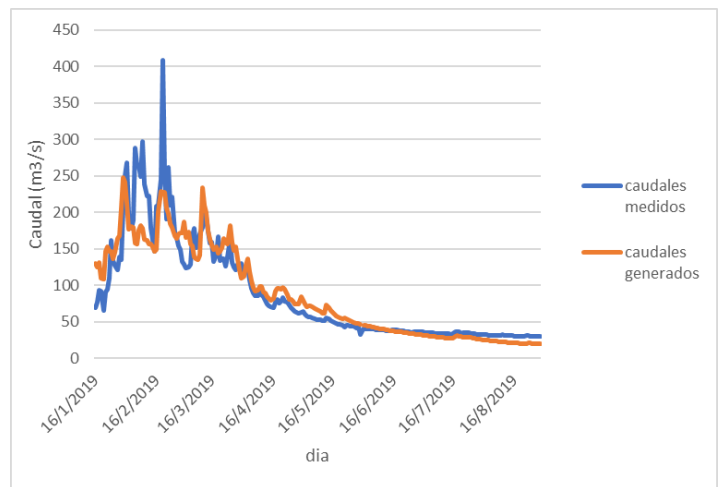
**Tabla 3:** Valores iniciales para la cuenca calibrada

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

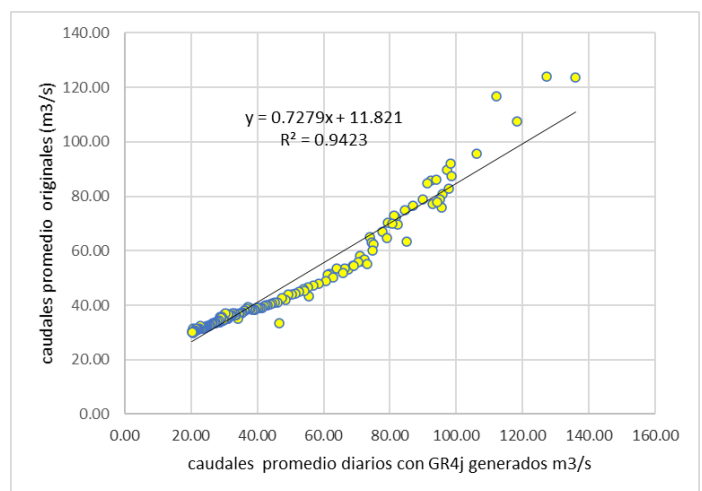
**Tabla 4:** Criterios de eficiencia de la calibración del modelo

Nash(Q)	90.13
Nash(VQ)	92.58
Nash(ln(Q))	91.17
Bilan	92.63

En la figura 4, se puede apreciar la comparación de los caudales registrados en la estación hidrométrica Santa Rosa y los caudales generados usando el método GR4j entre los días 1/1/2019 al 8/07/2020, el cual corresponde al periodo de calibración. Así mismo el grafico 2 se muestra la excelente correlación  $R^2 = 0.94$  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 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 todo el periodo de tiempo por la estación Santa Rosa, el periodo de análisis fue de 554 días comprendido entre 01/01/2019 y el 08/07/2020. Con una duración del período de puesta en marcha de 40 días. El área de la cuenca Santa Rosa en ( $km^2$ ) se mantiene igual ( $4991.391689 km^2$ ).

**Tabla 5:** Parámetros del modelo GR4j usados para validar los datos de la cuenca Santa Rosa

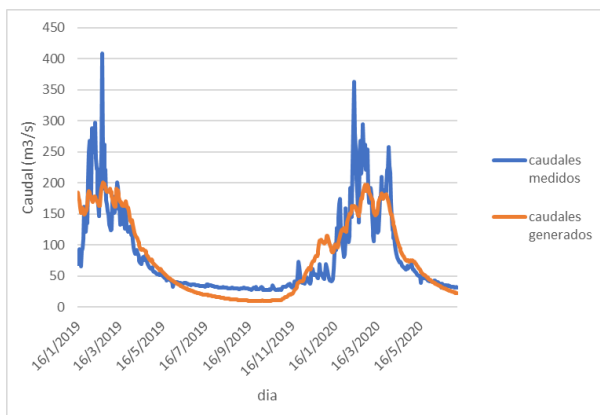
Parámetros del modelo	Transferencia
$X_1$ : Capacidad res. producción (mm)	6.72
$X_2$ : Parámetro de intercambio (mm)	-4.66
$X_3$ : Capacidad res. enrutamiento (mm)	6.51
$X_4$ : Retraso (días)	-13.62

**Tabla 6:** Valores iniciales para la cuenca Santa Rosa

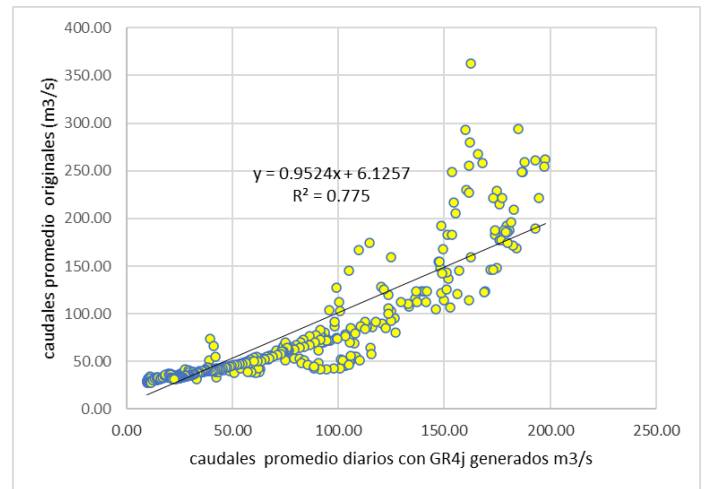
Valores iniciales	
Tasa de llenado inicial $S0/x1$	0.6
Tasa de llenado inicial $R0/x3$	0.7

**Tabla 7:** Criterios de eficiencia para la validación del modelo

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	80.63
Nash(VQ)	77.07
Nash(ln(Q))	51.89
Bilan	94.11



**Figura 6:** Comparativa de caudales medidos (ANA) y los generados con el modelo GR4j usando datos grillados ERA5 para el periodo 1/1/2019 al 7/7/2020. **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 observa en los resultados obtenidos en la parte de calibración, al ejecutar el Solver del Excel, los parámetros obtenidos nos dan un criterio de eficiencia de  $R^2$  por encima del 90% lo que significa el modelo GR4j se acopla muy bien al área estudiada de la cuenca Santa Rosa. Asimismo, si observamos la Figura 5, la curva donde se muestra la correlación entre los caudales observados y generados el  $R^2$  está en un valor de 0.94, al estar tan próximo al 1, nos da a entender que los datos tienen buena similitud. Por último, comparamos 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 el cual abarca todo el periodo de caudales registrados por la estación hidrométrica Santa Rosa, al usarse los mismos parámetros obtenidos en la calibración, en primer lugar, se observa que el criterio de eficiencia NASH está por encima del 80% dándonos a entender que el modelo sigue funcionando bien para la cuenca Santa Rosa. Pero si revisamos la Figura 7 donde nos 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 0.77 lo que nos 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 cercanos a los días 19/2/2019 y 8/7/2020, esto como se mencionó, podría deberse a datos atípicos en algún tramo de la cuenca Santa Rosa.

De esta manera, teniendo en cuenta que los resultados



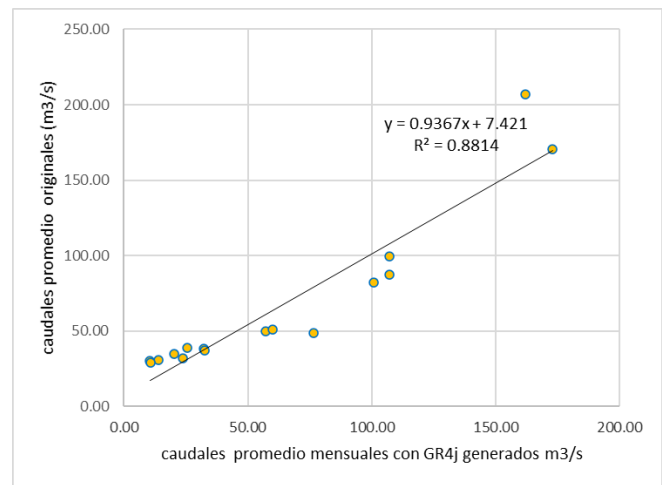
obtenidos en la calibración y validación son muy buenos según los criterios de NASH, están por encima del 80%, y en las gráficas de correlación se muestra un  $R^2$  por encima del 0.9 y cercano a 1 para la gráfica de la calibración y un  $R^2$  próximo a 0.7 para la validación, se puede decir que el método funciona para el área de la cuenca Santa Rosa, 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 validación.



**Figura 8:** Caudales generados diarios con el método GR4j, periodo 1990-2020. **Fuente:** Elaboración propia

Al ver la gráfica 5 se puede decir que, aunque existen datos atípicos en los días cercanos al 19/2/2019 y 8/7/2020, las curvas de ambos caudales, tanto los observados como los generados, son semejantes y los caudales diarios generados con el método GR4j nos proporciona la información para poder generar caudales diarios desde el 1/01/1990 al 31/12/2020, 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.

Esta información ayuda también a encontrar una relación de los caudales promedios mensuales observados y generados para el periodo en común entre los años 2019 y 2020 como se muestra en la gráfica 6, donde podemos ver que existe una buena correlación entre los datos con  $R^2 = 0.88$ .



**Figura 9:** Correlación  $R^2$  entre los caudales generados de datos promedios mensuales ( $m^3/s$ ) y caudales registrados promedio mensuales ( $m^3/s$ ) observados para el periodo de validación **Fuente:** Elaboración propia

#### IV. CONCLUSIONES

Podemos concluir que utilizando el método GR4j y corroborando la validez y susceptibilidad de las variables, se obtuvieron resultados aceptables para la obtención de caudales diarios en la cuenca Santa Rosa, los resultados de los valores de eficiencia que se obtuvieron se encuentran entre un 80% a un 100%, esto representa una relación de los datos entre bueno a excelente, lo que muestra el potencial del modelo a la hora de calibrar y la eficiencia que posee.

Los caudales generados pueden ser utilizados en la planificación de proyectos diversos, tanto hidráulicos como en el ámbito agrícola, civil y minero, que se desarrollen dentro de la cuenca del río Pachachaca.

#### REFERENCIAS

- [1] 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/Ruiz\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/4183/Ruiz_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [2] 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>
- [3] 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>
- [4] Senent Aparicio, J., Pérez Sánchez, J., López Ballesteros, A., Segura Méndez, F. J., & Pulido Velazquez, D. (2018). Using Multiple Monthly Water Balance Models to Evaluate Gridded Precipitation Products over Peninsular Spain [https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048944452&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=GR2M&nlo=&nlr=&nls=&sid=95489b3481606a72ccfd0e18864390cd&sot=b&sdt=cl&cluster=scopusbyr%2c"2018"%2ct%2c"2017"%2ct%2c"2016"%2ct&sl=19&s=TITLE-ABS-KEY%28](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048944452&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=GR2M&nlo=&nlr=&nls=&sid=95489b3481606a72ccfd0e18864390cd&sot=b&sdt=cl&cluster=scopusbyr%2c)

- [5] 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/11634/16704/2019laurarinc%C3%B3n.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- [6] 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>
- [7] Aybar Camacho, C., Lavado Casimiro, W., Huerta, A., Fernández Palomino, C., Vega Jácome, F., Sabino Rojas, E., & Felipe Obando, O. (2017). Uso del producto grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Nota Técnica N° 001 SENAMHI-DHI-201. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>