

Generation of daily flows using the GR4j model and the ERA5 gridded climatic product in the Crisnejas basin up to the Puente Crisnejas hydrometric station

Córdova Flores Marvin Paul¹, Falero Alama Andrea², Carmona-Arteaga Abel, Mg.Sc.³, Vereau Miranda Edmundo⁴^{1,2,3,4} *Universidad Privada del Norte, Perú, N00069828@upn.pe, N00263645@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe, edmundo.vereau@upn.edu.pe*

Abstract– Given the lack of hydrometeorological records in the Crisnejas basin, the present study aims to generate the flows on a daily scale in the main channel of the river up to the Crisnejas bridge station based on the ERA5 satellite-based climate grid data and the French precipitation model. GR4j runoff. This will serve as the basis for future hydrological studies in the Crisnejas River. For this work, it has been planned to carry out a calibration, validation and extension of the hydrometric records on a daily basis between the years 1979-2020.

Keywords-- Crisnejas Basin, GR4j, ERA5, Daily flows

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Generación de caudales diarios usando el modelo GR4j y el producto climático grillada ERA5 en la cuenca Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas

Córdova Flores Marvin Paul¹, Falero Alama Andrea², Carmona-Arteaga Abel, Mg.Sc.³, Vereau Miranda Edmundo⁴^{1,2,3,4} *Universidad Privada del Norte, Perú, N00069828@upn.pe, N00263645@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe, edmundo.vereau@upn.edu.pe*

Abstract– *Given the lack of hydrometeorological records in the Crisnejas basin, the present study aims to generate the flows on a daily scale in the main channel of the river up to the Crisnejas bridge station based on the ERA5 satellite-based climate grid data and the French precipitation model. GR4j runoff. This will serve as the basis for future hydrological studies in the Crisnejas River. For this work, it has been planned to carry out a calibration, validation and extension of the hydrometric records on a daily basis between the years 1979-2020.*

Keywords-- *Crisnejas Basin, GR4j, ERA5, Daily flows.*

Resumen- *Ante la falta de registros hidrometeorológicos en la cuenca Crisnejas el presente estudio tiene como objetivo generar los caudales a escala diaria en el cauce principal del río hasta la estación puente Crisnejas en base a los datos grillados climáticos de base satelital ERA5 y el modelo francés de precipitación escorrentía GR4j. Este servirá de base para futuros estudios hidrológicos en el río Crisnejas. Para este trabajo se ha previsto realizar una calibración, validación y extensión de los registros hidrométricos a paso diario entre los años 1979-2020.*

Palabras claves-- *Cuenca Crisnejas, GR4j, ERA5, Caudales diarios.*

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Perú se están realizando diferentes proyectos que necesitan una evaluación hidrológica tanto para construcción de represas, desarrollo de obras para el control de inundaciones, agricultura, etc. La ausencia de la realización de estos proyectos casi siempre se ha debido a la falta de mediciones de caudales en los ríos y registros de series de caudales de larga data.

En estos últimos años La autoridad Nacional del Agua (ANA) junto al el Servicio Nacional de Hidrología y meteorología (SENAMHI) vienen haciendo mediciones de registros hidrométricos a nivel diario en muchas cuencas. Lamentablemente, como se sabe en los estudios hidrológicos no es suficiente datos hidrométricos de corta data, sobre todos aquellos referidos a obras del control de inundaciones.

Debido a esta ausencia de registros hidrométricos, en estos últimos años se está usando cada vez más modelos de precipitación-escorrentía, para poder simular series de

caudales. Este es el caso de la cuenca del río Crisnejas, la cual ha sufrido del desborde de su cauce principal en innumerables ocasiones y lamentablemente no cuenta con una buena distribución de registros meteorológicos e hidrométricos [1].

Es por esta razón que en esta investigación se ha previsto usar el producto grillado climático de base satelital ERA5 y el modelo francés de precipitación escorrentía GR4j para poder calibrar, validar, y reconstruir el registro hidrométrico hasta la estación puente Crisnejas para los años 1979 -2020. La cual podrá ser usada mas adelante para futuros proyectos hidrológicos e hidráulicos.

II. MARCO TEORICO

2.1 Ubicación de la Cuenca

La cuenca hidrográfica del río Crisnejas se forma por la unión de los ríos Cajamarca y Condebamba perteneciendo a la Vertiente del Océano Atlántico, políticamente está ubicada en los departamentos de Cajamarca y La Libertad, abarcando las provincias de Cajamarca, Sánchez Carrión, Cajabamba y una parte de Santiago de Chuco. Siendo administrada por 3 autoridades del agua: ALA Crisnejas, ALA Cajamarca y una pequeña parte del ALA Huamachuco. todas pertenecientes al AAA VI Marañón, comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas WGS84: Longitud Oeste -78°38'02" Latitud Sur -8°00'55" como mínimo; y como máximo longitud Oeste -77°48'46" Latitud Sur -6°55'34" con una altitud mínima de 1078 msnm y máxima de 4525 msnm [2].

Asimismo, para el estudio de caudales se tuvo como estación hidrométrica Puente - Crisnejas ubicada en las coordenadas geográficas longitud 78°6'47.25" W, Latitud 7°27'48.719" S con altitud de 1992 msnm.

2.2 Datos morfológicos de la cuenca y meteorológica

La cuenca Crisnejas tiene un área de 4939.58Km² aproximadamente con un régimen del río irregular con flujo turbulento con caudal convencional de 12.23m³/s con longitud del río de 151.98Km y con pendiente del cauce principal promedio de 1.92%.

Para el presente estudio se realizó la delimitación de la cuenca del río Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente

Crisnejas, la cual abarco un área de 787.90Km². Esto se puede ver en la figura 1.

2.3 Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN)

Es el organismo encargado de la revisión y elaboración de la cartográfica nacional. Para la elaboración de estos gráficos se usó las cartas nacionales a una escala de 1:100 000 las cuales son: 14f, 15f, 15g, 16g, 17g, 15h y 16h.; Estas sirvieron para realizar la delimitación de la cuenca [3]

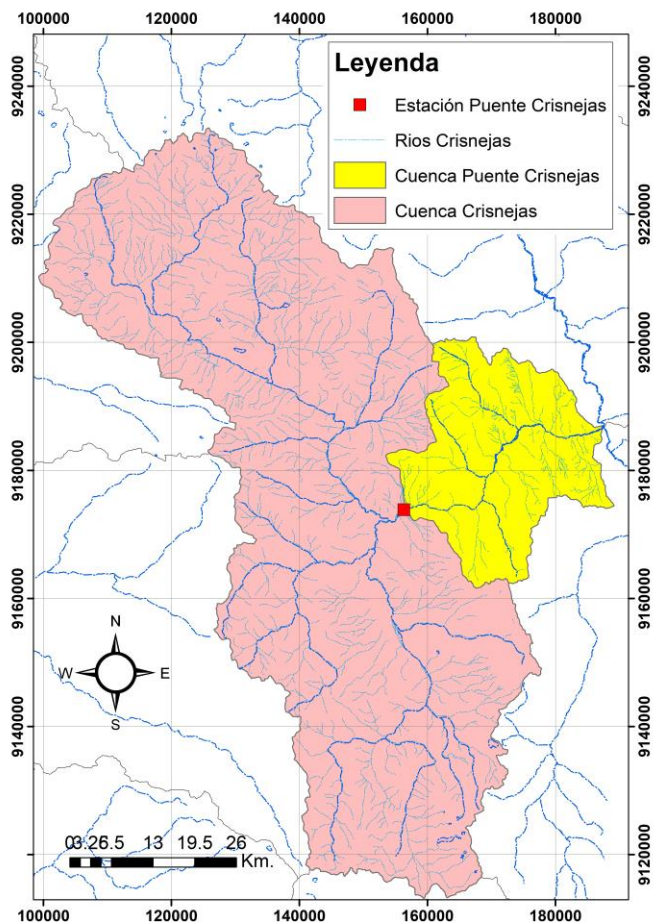


Fig. 1 Delimitación de la cuenca Crisnejas y la cuenca hasta la estación hidrométrica puente Crisnejas.

2.4 Google Earth Engine (GEE)

Para la obtención de los datos meteorológicos como la precipitación y temperatura promedio en la cuenca, se usó la plataforma (GEE), la cual es una herramienta innovadora de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar, descargar datos climáticos satelitales y realizar análisis geoespaciales usando procesamientos de imágenes multiespectrales y registros climáticos recopilados por satélites que orbitan nuestro planeta [4].

Por medio de esta plataforma, se extrajeron datos climáticos grillados usando el script suministrado por el Mg.

Sc. Abel Carmona Arteaga (link del script: <https://code.earthengine.google.com/83fce4f6cb32202e561e815f12111367>) con lo cual se obtuvieron la precipitación en metros y la temperatura en grados Kelvin, los cuales se convirtieron a milímetros y grados Celsius, respectivamente.

2.5 Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Es una entidad que tiene el mando técnico-normativo del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego que rige, preserva y defiende los medios hídricos de las diferentes cuencas optando por un crecimiento sostenido y responsabilidad nacional dándonos mediante su web los caudales promedios diarios [5]. Destacamos que para el uso del método GR4j se usaron los registros de caudales diarios entre los años 2014 al 2022 de este periodo se usaron dos rangos de tiempo entre los días 14/08/2016 al 24/10/2017 para la calibración y 01/01/2019 al 31/12/2019 para la validación.

2.6 ERA5

Es el último reanálisis climático producido por ECMWF, proporciona estimaciones por hora y diaria de una gran cantidad de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 30 km [6].

2.7 Modelo GR4j

Es un modelo que simula el proceso precipitación-escorrentía en una escala de tiempo diaria utilizando cuatro parámetros. Este modelo ha sido utilizado como simulación secuencial de datos de humedad y caudal del suelo en modelos conceptuales de precipitación-escorrentía, obteniendo resultados muy satisfactorios [7], por lo que se decidió utilizarlo en el desarrollo de este artículo. En la figura 2 podemos apreciar el algoritmo del modelo GR4j.

El modelo GR4j toma la precipitación y la evapotranspiración diaria promedio dentro del área de la cuenca como entrada y el caudal diario como salida. Asimismo, utiliza el coeficiente de Nash - Sutcliffe como función objetivo en la fase de calibración. En el modelo GR4j, la precipitación y la evapotranspiración potencial se expresan como y respectivamente (Rincón, 2019). [8]

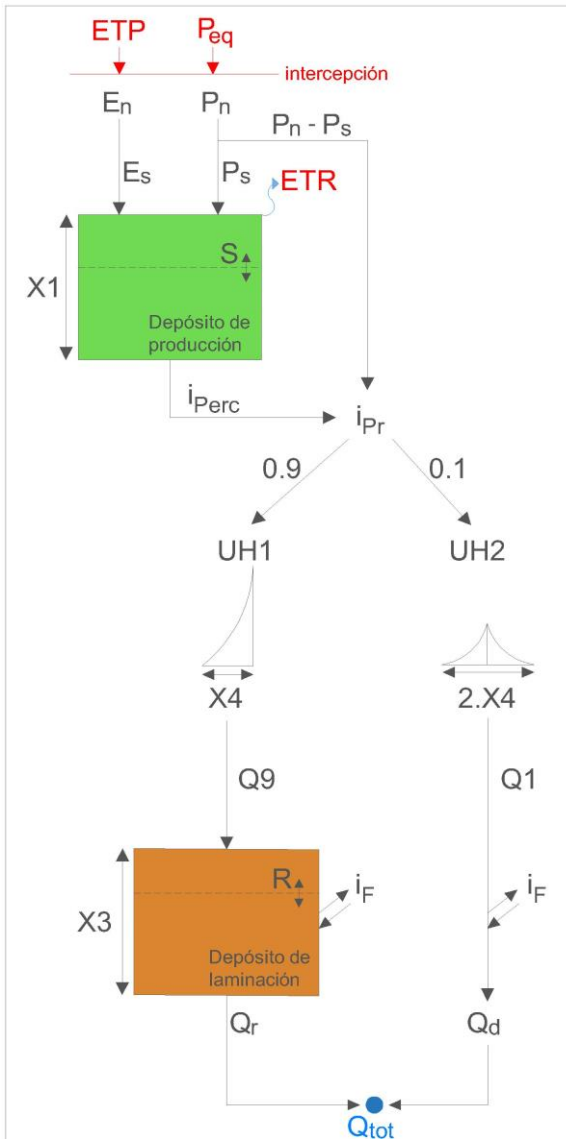


Fig. 2 GR4j modelo hidrológico (Perrin et al., 2010) [7].

Para nuestro caso, los valores de precipitación promedio registrados por teledetección y proporcionados en un conjunto de climas reticulares ERA5 se calculan mediante interpolación espacial. Cabe señalar que todas las cantidades, ya sean entradas, salidas o variables internas, se expresan en mm/día, por lo que los volúmenes de agua deben dividirse por el área de la cuenca cuando sea necesario.

2.8 Método de Malmstrom

Para poder estimar la evapotranspiración potencial se usó el método Malmstrom, este usa la presión de vapor a saturación (e_s), la cual está relacionada a la temperatura media [9]. Seguidamente, se muestra la expresión:

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

Donde e_s está dada por:

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

2.9 Coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de correlación (R^2) expresa la dependencia lineal entre dos variables; para este estudio nos referimos a los caudales medidos y los caudales generados [10].

En la tabla 1 se pueden apreciar los rangos de R^2

TABLA 1
Valores referenciales para el coeficiente de determinación

Fuente: Mirosław y Okruszko (2011) [11]

Rango del R^2	Categoría de calidad de modelo
$0.99 \leq R^2 < 1.00$	Excelente
$0.95 \leq R^2 < 0.99$	Muy bueno
$0.90 \leq R^2 < 0.95$	Bueno
$0.85 \leq R^2 < 0.90$	Bastante bueno
$0.80 \leq R^2 < 0.85$	Promedio
$0.70 \leq R^2 < 0.80$	Satisfactorio
$R^2 < 0.70$	Insuficiente

2.10 Coeficiente de determinación Nash - Sutcliffe

Es un criterio de ajuste de acuerdo con el valor referencial y de acuerdo con sus variables. Este puede ir cambiando parámetros en el modelo para que los resultados generados se parezcan a los observados, dando así una optimización al modelo. Este criterio va desde un menos infinito a uno, que según valores referenciales presenta un ajuste u otro [12].

Criterio de evaluación que determina la eficiencia entre un modelo simulado y otro observado midiendo la variabilidad de las observaciones [13]. Se expresa de la siguiente manera:

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

Dónde:

$Q_{sim,i}$: caudales simulados en m^3/s

Q_i : Caudales observados en m^3/s

\bar{Q} : Caudales medios observados en m^3/s

La Tabla 2 indica los valores de referencia del criterio de Nash.

Valores referenciales del Criterio de Nash – Sutcliffe (Molnar, 2011). [13]

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

III. RESULTADOS

Para proceder a desarrollar el método GR4j se empleó el Excel de Charles Perrin y Vazken Andréassian, el cual presenta una hoja de cálculo que se utiliza para realizar simulaciones de caudales en pasos de tiempo diarios, haciendo una mejora de un modelo global de precipitación y escurrimiento a través de un enfoque comparativo. Además, los valores de los parámetros X_1 , X_2 , X_3 , X_4 del modelo se pueden optimizar utilizando la función "Solver".

3.1 Calibración

Para el análisis de la cuenca Crisnejas se tomó un punto de cierre, siendo este la estación hidrométrica Puente Crisnejas, la cual posee un área de 787.90Km². Para la simulación de caudales en el proceso de calibración se tomó 437 días entre el 14/08/2016 y el 24/10/2017.

Al comparar los resultados de los de los caudales generados y los registrados, el criterio de Criterio de Nash – Sutcliffe nos da un valor de 77%, ubicándose así en el rango de 0.6 – 0.80 interpretándose que el ajuste realizado es muy bueno.

Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de calibración

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	76.6
Nash(VQ)	77.0
Nash(ln(Q))	55.8
Bilan	114.20

En la tabla 4 se pueden ver los parámetros de X, para la calibración.

Parámetros del modelo GR4j en el proceso de calibración

Parámetros	Unidad	Transf.
X_1	mm	6.61
X_2	mm	0.87
X_3	mm	5.25
X_4	días	-13.62

En la tabla 5 también podemos apreciar los valores iniciales de llenado

Valores iniciales para la cuenca hasta estación hidrométrica Puente Crisnejas para la calibración

Valores iniciales	
Tasa de llenado inicial S0/x1	0.3
Tasa de llenado inicial R0/3	0.7

En la tabla 6 también podemos apreciar los datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración

Datos hidrométricos utilizados en el proceso de calibración

Precipitación media observada (mm/día)	5.234
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.094
Caudales medios observados (mm/día)	2.700
Promedio de las raíces de los caudales observados	1.280
Logaritmo promedio de flujos observados	0.025

Una vez que se realizó el proceso de calibración y se obtuvieron los parámetros de ajuste del modelo, se realizó una comparativa de los datos de caudales medidos por el ANA y los caudales diarios generados por el modelo Gr4j usando los datos de ERA5, presentándose así un criterio de eficiencia del 77%. En general los periodos de calibración del 14/08/2016 y el 24/10/2017 son óptimos, reflejándose en la similitud que se grafica en la comparativa de curvas. Esto podemos verlo en la figura 3.

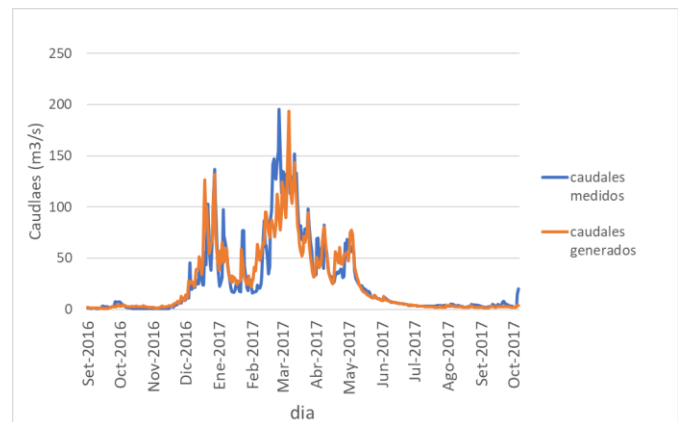


Fig. 3 Comparativa entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de calibración

Analizando estos datos se puede lograr estimar de manera óptima los caudales diarios, ya que al generar una comparativa de los caudales diarios generados con el GR4j, proyectando de manera polinómica se obtiene un coeficiente de correlación (R^2) igual a 0.8168. Este valor se encuentra cerca de 1, interpretándose que este modelado generado de caudales diarios en el periodo calibrado presenta una buena afinidad.

En la figura 4 se puede observar la Correlación del R^2 comparativa de caudales diarios medidos (ANA) y caudales

generados para la cuenca Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas en el proceso de calibración entre los días 14/08/2016 al 24/10/2017.

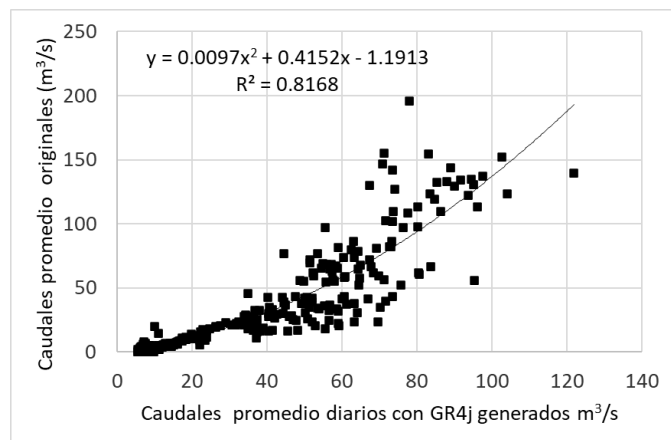


Fig. 4 Correlación del R^2 entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de calibración

3.2 Validación.

En esta etapa de análisis, para la simulación de caudales en el proceso de validación se tomó 529 días entre el 28/01/2019 y al 9/07/2020, siendo estos diferentes a los periodos de calibración para determinar si los cálculos obtenidos en esta siguen una tendencia similar.

Al comparar los resultados de los de los caudales generados y los registrados, el criterio de Nash – Sutcliffe nos da un valor de 86.4%, ubicándose así en el rango mayor a 0.80 interpretándose que el ajuste realizado es muy bueno.

TABLA 7

Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de validación

Criterios de eficiencia (%)	
Nash(Q)	84.4
Nash(VQ)	86.4
Nash(ln(Q))	82.5
Bilan	103.7

En la tabla 8, se observan los parámetros del método GR4j calculados para la subcuenca hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas y en la tabla 9 los valores iniciales para la calibración.

TABLA 8

Criterios de eficiencia (%) obtenidos en el proceso de validación

Parámetros	Unidad	Transf.
X_1	mm	5.40
X_2	mm	1.47
X_3	mm	5.17
X_4	días	-13.62

TABLA 9

Valores iniciales para la cuenca hasta estación hidrométrica Puente Crisnejas para la validación

Valores iniciales	
Tasa de llenado inicial S0/x1	0.3
Tasa de llenado inicial R0/3	0.7

Además, en la tabla 10 se tienen los datos hidrométricos utilizados en el proceso de validación

TABLA 10

Datos hidrométricos utilizados en el proceso de validación

Precipitación media observada (mm/día)	4.782
Promedio de ETP observados (mm/día)	2.100
Caudales medios observados (mm/día)	3.316
Promedio de las raíces de los caudales observados	1.523
Logaritmo promedio de flujos observados	0.459

En la figura 5 se puede apreciar la comparativa entre los caudales diarios medidos (ANA) y caudales generados (ERA5) para la cuenca hasta estación hidrométrica Puente Crisnejas para la validación

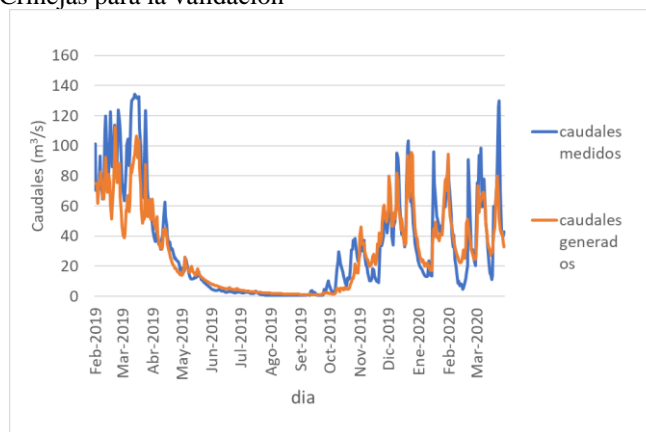


Fig. 5 Comparativa entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de validación

En esta comparativa de caudales estimados y medidos se pudo corroborar que el modelo utilizado se ajustó correctamente a una ecuación lineal, con $R^2=0.7911$ (coeficiente de correlación) muy cerca de 1. Esto demostraría que hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas en los periodos diarios tomados existe una buena reciprocidad, pudiéndose así tener una estimación de los caudales. Esto podemos verlo en la figura 6.

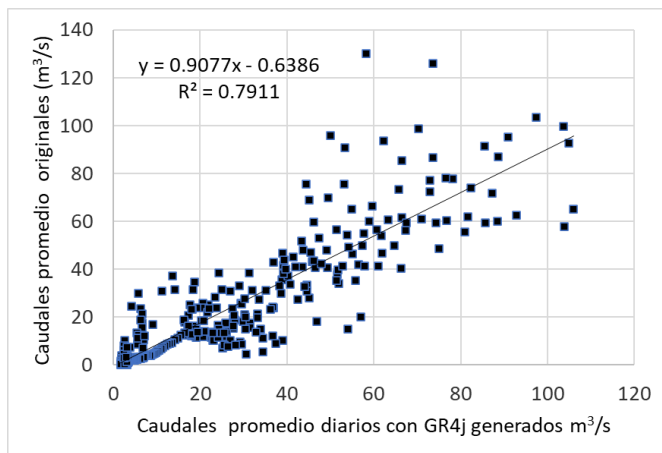


Fig. 6 Correlación del R^2 entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en el proceso de validación

3.3 Extensión de caudales

Finalmente, al ser los parámetros de calibración y validación muy similares como se muestra en la tabla 4 y tabla 8 se usaron los parámetros de la calibración para poder generar los caudales diarios en el periodo 02/01/1979 al 09/07/2020, usando el modelo de precipitación escorrenría GR4j.

Estos caudales fueron usando la información de los registros climáticos grillados de precipitación y temperatura obtenidos a través del ERA5 desde la plataforma GEE. En la Figura 7 se pueden apreciar el buen ajuste entre los caudales generados y medidos.

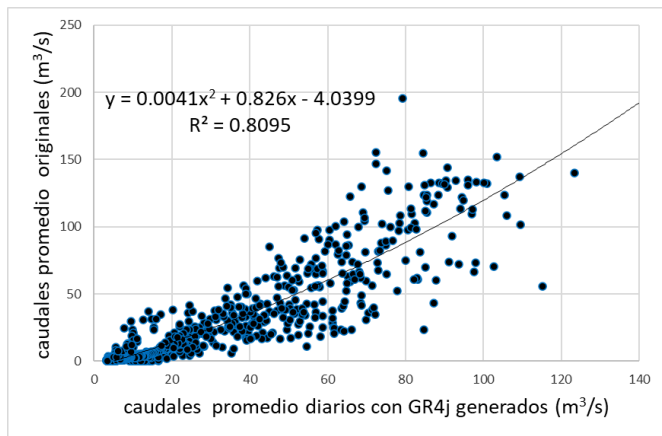


Fig.7 Correlación del R^2 entre los caudales promedio originales (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados en todo el periodo de análisis

Para un mejor ajuste se realizó un reajuste con una ecuación polinómica de segundo orden, con ello se puede apreciar una para los caudales generados en mejor aproximación de los caudales generados en la cuenca del río Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas, esto se puede apreciar en la figura 8.

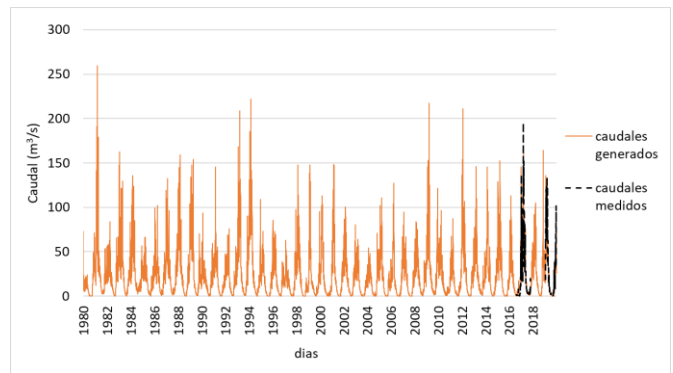


Fig. 8 Comparativa diaria de caudales medidos (ANA) y caudales promedio diarios con GR4j generados para la cuenca del río Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas entre los días 02/01/1979 hasta el 09/07/2020

IV. CONCLUSIONES

En síntesis, de acuerdo con el análisis exhaustivo de la presente investigación se pudieron obtener coeficientes R^2 satisfactorios para el periodo de calibración y validación entre los caudales generados con la información climática del ERA5 y la información que brinda la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para la para la cuenca del río Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas, estos coeficientes están en rango de 79 y 80% respectivamente.

Esto da gran validez a al estudio, y según los resultados podemos indicar algunos caudales extremos que se pudieron haber presentado en la cuenca del río Crisnejas hasta la estación hidrométrica Puente Crisnejas sobrepasaron los $200\text{m}^3/\text{s}$, lo que en su momento pudo generar desbordes del cauce del río Crisnejas.

Estos registros generados podrán ser usando más adelante para poder elaborar proyectos de prevención ante futuros desbordes en el río Crisnejas.

V. REFERENCIAS

- [1] MINSA, 2018, Incremento del caudal del río Crisnejas. Recuperado de <http://www.minsa.gob.pe/digerd/images/gestor/coe/670.PDF>
- [2] ANA, 2015, Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Crisnejas. Recuperado de https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/38/ANA000047_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] Instituto Geográfico Nacional - Infraestructura de Datos Geoespaciales Fundamentales. <https://www.idep.gob.pe/>
- [4] G. A. & M. J.-F. Perilla, 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, 2020.
- [5] La Autoridad Nacional del Agua Drupal. Autoridad Nacional del Agua - ANA. Recuperado de <https://www.ana.gob.pe/contenido/la-autoridad-nacional-del-agua>
- [6] Datos de ERA5 | Cloud Storage | Google Cloud. (2023), from <https://cloud.google.com/storage/docs/public-datasets/era5?hl=es-419>
- [7] Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of hydrology, 279(1-4), 275-289.
- [8] Rincón Achury, L. V. Aplicación de los modelos lluvia-escorrenría GR2m y GR4j en la cuenca del río Gualf para la gestión de los recursos

- hídricos. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16704/2019laurarinc%C3%B3n.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- [9] Carmona Arteaga, A. (2019). Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada pisco para las cuencas del río Biabo.
 - [10] Coy Murcia, L. C. (2017). Ajuste y validación del modelo precipitación–escorrentía GR2m aplicado a la subcuenca Nevado.
 - [11] Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.
 - [12] Mirosław-Swiatek, D., & Okruszko, T. (2011). Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment. Springer.
 - [13] Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.