



Artículo

Estudio de comparación de datos meteorológicos de reanálisis del Sistema de Predicción del Clima (CFSR) y Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) con datos de la estación del municipio de Viacha, La Paz

Comparison study of meteorological data from Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) and National Centers for Environmental Prediction (NCEP) with data from the Station in the Municipality of Viacha, La Paz

Marcela Daniela Mollericona Alfaro, Joel Moisés Mamani Huanca

RESUMEN:

Muchas regiones presentan una limitada disponibilidad de datos climáticos, aunque estos son importantes en el modelamiento hidrológico, la planificación del riego y otras aplicaciones. De esta forma fue desarrollado el *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) de los *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) para la predicción de datos en cualquier ubicación geográfica para el período de 1979 a 2014. Por tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de datos de reanálisis del CFSR para la predicción de datos de precipitación (PP), temperaturas mínima, media y máxima (Tmin, Tmed y Tmax, respectivamente), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (Vv) en el municipio de Viacha, mediante el uso de distintos indicadores estadísticos como el Coeficientes de correlación (r) y de Determinación (R^2), Índice de Concordancia de Willmot (d); el Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), Error Medio Absoluto (MAE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), y el Porcentaje de Sesgo (PBIAS). Los resultados obtenidos indican que las variables Tmin y Tmed muestran los valores más altos para el R^2 (0.88 y 0.71 respectivamente), para el NSE (0.64 y 0.68) y para el índice d (Willmot) obtuvieron valores iguales a 0.90. Por tanto, en base a los diferentes indicadores estadísticos empleados, los datos de reanálisis proporcionados por el NCEP-CFSR presentan una predicción aceptable sólo para las variables Tmin y Tmax en el municipio de Viacha, La Paz.

PALABRAS CLAVE:

reanálisis, datos meteorológicos, predicción de datos, indicadores estadísticos.

ABSTRACT:

Many regions have limited availability of climate data, although these are important in hydrological modeling, irrigation planning and other applications. Thus, the *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) of the *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) was developed to provide meteorological data in any geographic location during the period from 1979 to 2014. Therefore, the present study aimed to evaluate the performance of CFSR data for the prediction of precipitation (PP), minimum, mean and maximum temperatures (Tmin, Tmed and Tmax, respectively), relative humidity (RH) and wind speed (Vv) in the municipality of Viacha, through the use of different statistical indicators such as the Coefficients of Correlation (r) and of Determination (R^2), Willmot's Concordance Index (d); the Nash-Sutcliffe Efficiency Index (NSE), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Percentage Bias (PBIAS). The results obtained indicate that the variables Tmin and Tmed show the highest values for the R^2 (0.88 and 0.71 respectively), for the NSE (0.64 and 0.68) and for the d index (Willmot) they obtained values equal to 0.90. Therefore, based on the different statistical indicators used, the reanalysis data provided by the NCEP-CFSR present an acceptable prediction only for the variables Tmin and Tmax in the municipality of Viacha, La Paz.

KEYWORDS:

reanalysis, meteorological data, data forecasting, statistical indicators.

AUTORES:

Marcela Daniela Mollericona Alfaro: Maestrante Programa de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-Brasil. Docente Investigadora, Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz-Bolivia. marcela.mollericonaalfaro@yahoo.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8243-781X>

Joel Moisés Mamani Huanca: Maestrante Programa de Postgrado en Mejoramiento Genético de Plantas, Universidad Agraria La Molina, Lima-Perú. Docente Investigador, Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz-Bolivia. joelmoises17@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3137-5828>

Recibido: 17/02/2021. Aprobado: 15/11/2021.



INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de datos meteorológicos es crucial por sus múltiples aplicaciones, que van desde la determinación del equilibrio hidrológico, gestión del agua, diseño y planificación de proyectos de riego, hasta otros diferentes usos.

La escasez de datos –en cantidad y calidad – ha sido un problema en el modelamiento de recursos hídricos, ya que no siempre existe la disponibilidad de estaciones meteorológicas convencionales con una adecuada distribución espacial y temporal, especialmente en países en desarrollo (Dile y Srinivasan, 2014). En ese mismo sentido, Quispe (2018) indica que la mayoría de las estaciones meteorológicas en Bolivia no cuentan con información de datos pluviométricos y según Blacutt *et al.* (2015) en terrenos complejos como regiones en los Andes, la cobertura de pluviómetros y datos es escasa, problema que va acompañado de la falta de fiabilidad del acceso a los datos, creándose un escenario de conocimiento limitado.

El conjunto de datos de Reanálisis y previsión del Sistema de Pronóstico del Clima (*Climate Forecast System Reanalysis*, CFSR) o análisis retrospectivo, es la más reciente versión del modelo de los Centros Nacionales de Reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima de Predicción Ambiental (*National Centers for Environmental Prediction's*, NCEP) (Quadro *et al.* 2013; Auerbach *et al.* 2016). Existen dos tipos de fuentes de datos disponibles para la precipitación: observaciones de superficie (como los pluviómetros) y mediciones indirectas (como satélites o radar) (Blacutt *et al.* 2015). Para la caracterización de la precipitación, es posible combinar conjuntos de datos de observación y estimaciones satelitales para generar los denominados “reanálisis”, cuyos datos representan estados atmosféricos reticulados de última generación durante períodos específicos (Blacutt *et al.* 2015).

De acuerdo con Silva *et al.* (2011) el proyecto CFSR proporciona un conjunto de datos climáticos mejorado para la investigación y un sistema de pronóstico mejorado para pronósticos intraestacionales y estacionales, que puede ser utilizado por una amplia gama de tomadores de

decisiones en agricultura, gestión de recursos hídricos, emergencias, etc. El uso de datos del CFSR en modelamiento de cuencas podría ser aplicado de manera confiable y ofrece nuevas oportunidades en el modelamiento en tiempo real (Fuka *et al.* 2014).

Los datos CFSR contienen registros de precipitación histórica y temperaturas de cada hora en cualquier lugar del mundo, que son producidos usando técnicas de última generación y están basados en un modelo acoplado océano-atmósfera que consiste en el sistema de pronóstico global del NCEP para la atmósfera y el modelo oceánico (MOM4), incluido un componente interactivo marino (Bao y Zhang, 2013). Estos datos utilizan técnicas numéricas de previsión del tiempo con una resolución del componente atmosférico de 0,3125 (~ 38 km), con 64 niveles verticales que se extienden desde la superficie hasta 0.26 hPa (Saha *et al.* 2010; Bao y Zhang, 2013; Fuka *et al.* 2014). La producción consiste en varias interpolaciones espaciales y temporales sobre datos meteorológicos, otras observaciones convencionales y productos de satélite (Dile y Srinivasan, 2014).

Además de contar con cobertura espacial global, el CFSR ofrece un registro completo, continuo y consistente desde 1979 a la actualidad, ofreciendo un registro de estimaciones de variables de limitada disponibilidad como la radiación solar, humedad atmosférica y velocidad del viento (Auerbach *et al.* 2016), lo que permitiría un modelamiento integral de cuencas hidrográficas en regiones sin datos meteorológicos o con lagunas (Roth y Lemann, 2016). Según Silva *et al.* (2011) el reanálisis del sistema de pronóstico del clima (CFSR) se distingue de los reanálisis anteriores del NCEP (R1 y R2), en que: a) posee una mayor resolución horizontal y vertical (una atmósfera con resolución horizontal de T382 espectral, y resolución vertical de 64 niveles híbridos sigma-presión), b) el pronóstico de conjetura se genera a partir de un sistema acoplado atmósfera-océano-hielo marino-tierra, y 3) se asimilan las mediciones históricas de radiancia por satélite.

En Sud América diferentes trabajos emplearon datos CFSR con el modelo SWAT, como: Eichler y Londoño (2013) que compararon datos CFSR -de alta resolución- con el reanálisis II de rejilla

gruesa o Re2, aplicado a la climatología y la variabilidad interanual de América del Sur y demostraron que los datos CFSR son capaces de capturar características como los efectos de las montañas de los Andes en la circulación general con más detalle que los datos Re2. Por otro lado, Rocha y Mendes (2018) demostraron la posibilidad del uso de datos observados y de reanálisis juntos, en lugares donde existía deficiencia de informaciones o estaciones. Bressiani *et al.* (2015) evaluaron datos de precipitación, obteniendo un mejor desempeño en la simulación de caudales (mejores valores estadísticos) en comparación con otros conjuntos de datos, recomendando que el uso de datos CFSR para parámetros diferentes a la precipitación, pueden proporcionar respuestas hidrológicas razonables. Paz *et al.* (2018) también emplearon datos de estaciones locales con datos CFSR, obteniendo resultados satisfactorios; De Lima y Alcântara (2019) evaluaron datos CFSR para reproducir extremos de temperatura y precipitación mediante índices climáticos y Silva *et al.* (2011) observaron mejoras notables en padrones de precipitación en larga escala en comparación a reanálisis anteriores. También Quadro *et al.* (2013) concluyeron que el CFSR proporcionó la mejor correlación en tres regiones de Sud América, en comparación con otros conjuntos de reanálisis.

Sin embargo, pocos fueron los estudios que analizaron el desempeño de los datos CFSR en Bolivia. Tal como el caso de Blacutt *et al.* (2015), que compararon la precipitación de conjuntos de datos CFSR, MERRA, TRMM3B42 y Combined Schem en Bolivia en los Andes centrales y el Altiplano a grande escala. En este sentido, los autores señalaron que, para mejorar el conocimiento de los sesgos y errores en los diferentes productos, se debe explorar la dependencia topográfica, como la altura, la pendiente y la orientación de la pendiente, en relación con la dirección del viento y la precipitación diaria.

También, Silva *et al.* (2011) indicaron que estudios futuros podrían explorar posibles causas de los sesgos del CFSR, a fin de proporcionar a los desarrolladores de modelos información adicional que conduzca a mejoras en el modelo. Es necesaria una evaluación más profunda en los Andes Centrales, donde el efecto de la topografía asociado principalmente a la precipitación sólida corresponde

a la persistencia de precipitaciones sobreestimadas (Salio *et al.* 2015). Adicionalmente, Blacutt *et al.* (2015) añaden que el conocimiento sobre las capacidades y limitaciones de los productos de precipitación en Bolivia es aún escaso.

En ese sentido, son varias las investigaciones que destacan la importancia de pruebas con datos reanálisis para verificar si los conjuntos de datos representan las realidades locales, principalmente en áreas con escasez de datos. De esta forma, con el presente trabajo se tuvo como objetivo evaluar el desempeño de datos de reanálisis NCEP-CFSR en la previsión de diferentes datos meteorológicos para el municipio de Viacha del departamento de La Paz, comparando dos conjuntos de datos: los observados en una estación meteorológica del municipio y datos de reanálisis, mediante diferentes indicadores estadísticos de desempeño.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El presente estudio fue realizado con datos observados (*O_i*) en la estación meteorológica (EM) convencional localizada en el municipio de Viacha, obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), con coordenadas 16° 39' 30" latitud sur y 68° 16' 55" longitud oeste, a una altitud de 3850 (SENAMHI, 2020). El municipio es capital de la provincia Ingavi en el departamento de La Paz y está ubicado entre los paralelos 16°32' 39" y 16° 54' 44" de latitud sur, y entre los meridianos 68°16' 56" y 68°22' 72" de longitud oeste, con altitudes que varían desde los 3540 hasta los 4600 msnm (Plan de Desarrollo Municipal, 2012). Además, forma parte de la cuenca del río Katari, parte de la cuenca endorreica del Altiplano. Presenta dos pisos ecológicos: la Zona de relieve montañosa y la Zona de altiplanicie o llanura (38 y 62% del área, respectivamente).

Los datos *O_i* fueron comparados con datos de reanálisis globales (*P_i*) del NCEP-CFSR, obtenidos para el período de 1979 a 2014. Los datos de reanálisis se obtuvieron en el portal: Global Weather Data for SWAT (<http://globalweather.tamu.edu/>) disponibles por la Universidad de Texas A & M. Los datos *P_i* son proporcionados en el formato de archivo SWAT, con una resolución horizontal de ~38 km (0,3125°), cobertura global y proporcionados en

una cuadrícula gaussiana definida por el NCEP (designada T382) (Saha *et al.* 2010; Rocha y Mendes 2018). Son obtenidos a partir de técnicas de asimilación de datos de punta (observaciones de estaciones meteorológicas convencionales como irradiaciones de satélites) como componentes avanzados de modelamiento atmosférico, oceánico y de superficie (Lu *et al.* 2019).

Los conjuntos de datos evaluados en el presente estudio fueron: precipitación (PP, mm), temperatura mínima, media y máxima (Tn, Tm, Tx, °C), humedad relativa del aire (HR, %) y velocidad del viento (Vv, m s⁻¹).

Metodología

Inicialmente fueron empleadas técnicas graficas de caja (boxplots), gráficos de dispersión 1:1, series temporales, que permitieron una comparación visual (Harmel *et al.* 2014) y son esenciales para una evaluación apropiada de modelos, junto a una comparación con estadísticos de tendencia central y variabilidad. Los indicadores de desempeño empleados se describen a continuación:

- Análisis de regresión: Coeficiente de correlación (r) y de Determinación (R^2),
- Análisis adimensionales: Índice de Concordancia de Willmot (d) y el Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE),
- Índices de error: Error Medio Absoluto (MAE), Raíz del Error Cuadrático Medio ($RMSE$), Porcentaje de Sesgo ($PBIAS$)

Los indicadores de regresión fueron empleados para determinar la fuerza de relación entre dos bases de datos. Las técnicas adimensionales proporcionan una evaluación de la bondad del ajuste relativo, y los índices de error cuantifican el desvío de las unidades de los datos de interés (Moriasi *et al.* 2007). Los indicadores empleados están representados en las ecuaciones (1) – (6).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]} \quad (4)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) * (100)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (6)$$

n es el número de observaciones, P_i se refiere a los valores de la variable meteorológica obtenida en la base de datos de reanálisis del NCEP-CFSR, y O_i a los datos observados en la estación meteorológica.

Tanto R^2 como r describen el grado de colinearidad entre los datos simulados y medidos. El coeficiente r varía de -1 a 1 y es un índice o grado relación linear entre dos series de datos; R^2 varía de 0 a 1, con valores más altos indicando menos variación del error y generalmente valores superiores a 0,5 son considerados aceptables (Moriasi *et al.* 2007). La clasificación de los valores de r se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los valores del coeficiente de correlación de Pearson (r)

Coeficiente de correlación (r)	Clasificación
0,0 – 0,1	Prácticamente cero
0,1 – 0,3	Bajo
0,3 – 0,5	Moderado, medio
0,5 – 0,7	Alto
0,7 – 0,9	Muy alto
0,9 – 1,0	Casi perfecto

Fuente: Hopkins (2000)

El NSE, definido por Nash y Sutcliffe (1970) es un indicador usado ampliamente en previsión climática, cuyo valor varía de $-\infty$ a 1 y es más riguroso que R^2 . El NSE determina la magnitud relativa de la varianza residual, indicando cuan bien el gráfico de datos observados y simulados se ajustan a la línea 1:1. Moriasi *et al.* (2007) proponen la clasificación de NSE =1 como “ajuste perfecto” y NSE > 0,50 como “satisfactorio”. Aunque los mismos autores consideran que valores entre 0 y 1 son generalmente

vistos como “aceptables” y valores < 0 como “inaceptables”.

El índice de concordancia (d) de Willmott (1981) mide el grado de predicción libre de errores, varía entre 0 y 1, siendo el valor 1 como de “perfecta concordancia”. Con el objetivo de dar soporte al análisis también se calculó el índice de desempeño (c) (Camargo y Sentelhas, 1997; Da Cunha *et al.* 2013), que es el producto entre los coeficientes r y d , y se clasifica de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Criterio de interpretación del índice de desempeño (c)

Índice de desempeño (c)	Clasificación
$> 0,85$	Óptimo
$0,76 - 0,85$	Muy bueno
$0,66 - 0,75$	Bueno
$0,61 - 0,65$	Mediano
$0,51 - 0,60$	Bajo
$0,41 - 0,50$	Malo
$\leq 0,40$	Pésimo

Fuente: Camargo y Sentelhas (1997)

El PBIAS (expresado en porcentaje) mide la tendencia media de datos simulados para ser mayores o menores que sus contrapartes observadas, siendo el valor óptimo igual a 0 con valores bajos que indican simulación precisa; valores positivos indican sesgo de subestimación y los negativos, indican valores de superestimación (Moriasi *et al.* 2007). Los valores del PBIAS pueden interpretarse como de “buen desempeño” cuando $10\% < \text{PBIAS} < 15\%$, e “insatisfactorio” si el PBIAS es $\geq 25\%$. Valores de MAE y RMSE iguales a 0 indican un “ajuste perfecto”. El grado en que RMSE excede al MAE es un indicador de la extensión en que los outliers existen en los datos (Legates y McCabe, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observan las variaciones temporales mensuales de la precipitación en el municipio de Viacha, donde los datos CFSR tienden a sobreestimar a los datos observados durante la

mayoría de los años en estudio; hecho que coincide con el valor del PBIAS (Tabla 4) igual a -99.90 que, al ser negativo, indica errores de sobreestimación (Moriasi *et al.* 2007). Dile y Srinivasan (2014) también obtuvieron que la precipitación media anual del CFSR excedió la precipitación anual de datos convencionales en la mitad de las áreas estudiadas ($145-400$ mm), lo que influyó en mayores valores de los componentes del balance hídrico en el modelo SWAT.

Por otro lado, Paz *et al.* (2018) encontraron que el uso de datos CFSR + datos de estaciones locales mejoró las estadísticas en sub-cuencas con pocas estaciones pluviales o en aquellas que tenían datos faltantes. Fuka *et al.* (2014) y Paz *et al.* (2018) indicaron que, en cuencas relativamente áridas o áreas secas, es más difícil la realización del modelamiento hidrológico, posiblemente porque grandes eventos de escurrimiento son desencadenados por pequeños eventos de precipitación localizados, los cuales no son representados por los datos CFSR en escala gruesa o por los datos de las estaciones locales. De forma similar, Bressiani *et al.* (2015) sugieren el uso de datos CFSR para parámetros climáticos distintos a la precipitación, dado que por lo general son menos confiables en cantidad, calidad y distribución espacial. Sin embargo, estudios como los de Eini *et al.* (2019) sugieren que, en regiones con cuencas semiáridas, los datos de reanálisis se presentan como una alternativa válida para el modelamiento hidrológico.

La región boliviana presenta características que influyen en las características temporales y espaciales de la precipitación (Blacutt *et al.* 2015). Silva *et al.* (2011) encontraron que la intensidad de la lluvia CFSR y Re2 sobre los Andes probablemente se deba a un sesgo húmedo en lugar de una capacidad mejorada para mostrar regiones localizadas de lluvia intensa; sin embargo, también sugieren que la precipitación de CFSR es más realista que Re2 debido a su escala espacial más fina.

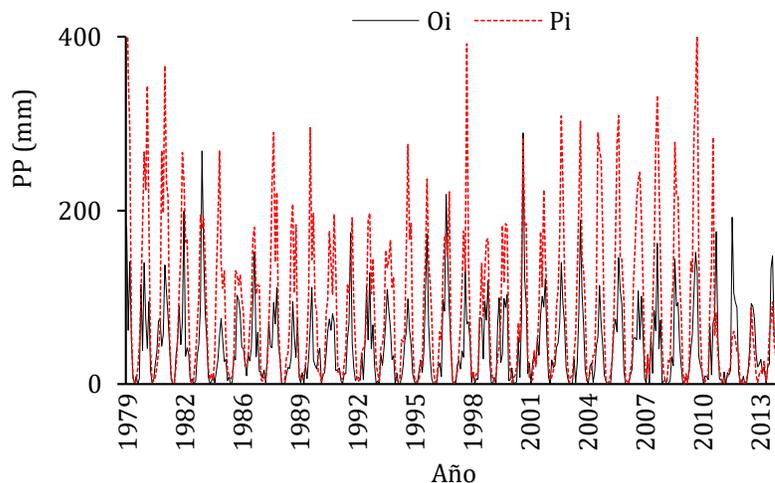


Figura 1. Tendencia temporal de la precipitación mensual derivada de la Estación Meteorológica (EM) (Oi) y el NCEP-CFSR (Pi), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

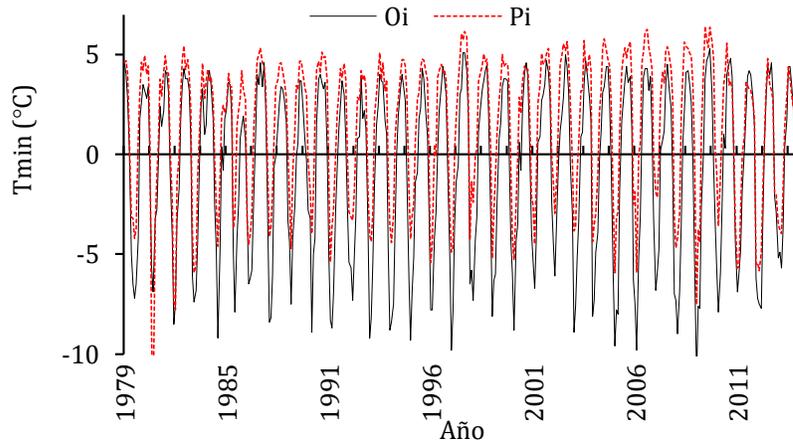


Figura 2. Tendencia temporal de la Temperatura mínima (Tmin) derivadas de la Estación Meteorológica (EM) (Oi) y el NCEP-CFSR (Pi), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

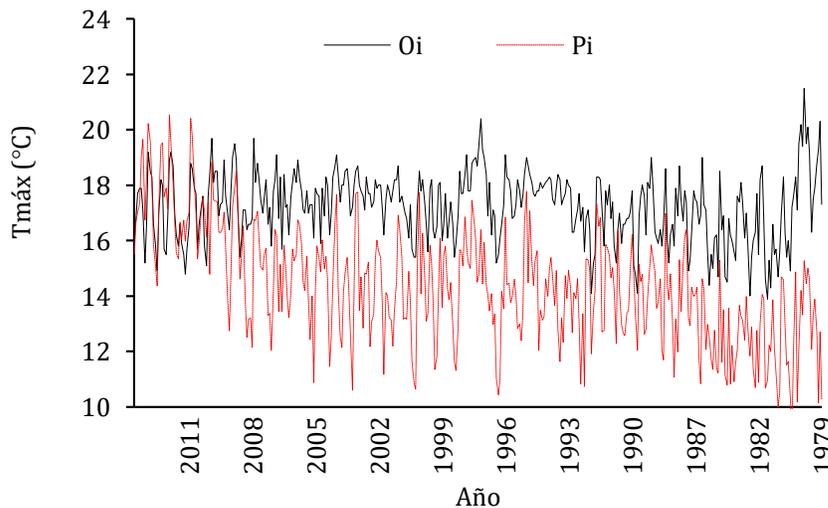


Figura 3. Tendencia temporal de la Temperatura máxima (Tmax) derivadas de la Estación Meteorológica (EM) (Oi) y el NCEP-CFSR (Pi), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

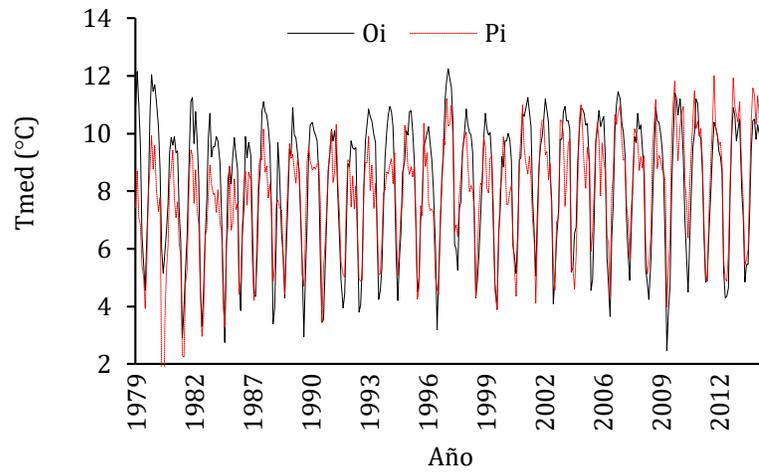


Figura 4. Tendencia temporal de la Temperatura media (Tmed) derivadas de la Estación Meteorológica (EM) (Oi) y el NCEP-CFSR (Pi), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

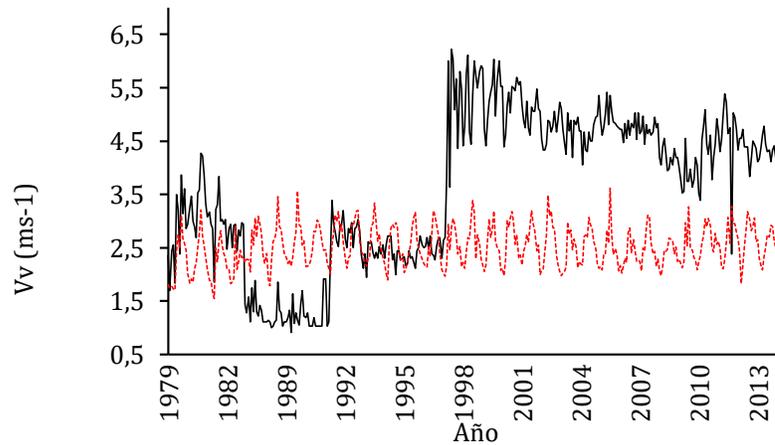


Figura 5. Tendencia temporal de la velocidad del viento (Vv) derivadas de la Estación Meteorológica (EM) (Oi) y el NCEP-CFSR (Pi), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

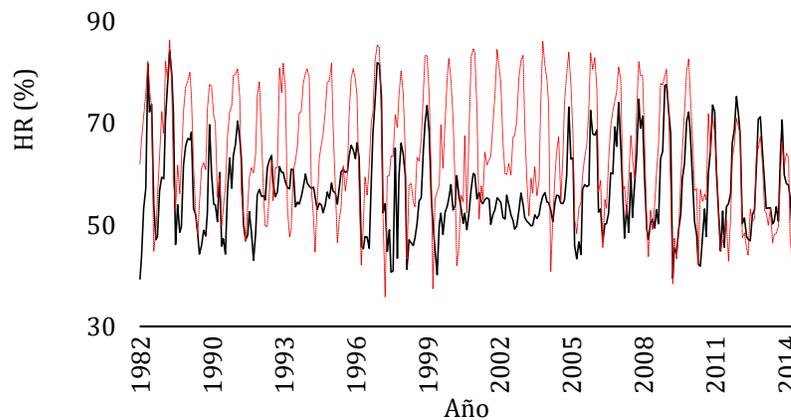


Figura 6. Tendencia temporal de la Humedad relativa (HR) derivadas de la Estación Meteorológica (EM) (Oi) y el NCEP-CFSR (Pi), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

En las Figuras 2 y 4 que muestran la T_{min} y la T_{med}, se observan tendencias temporales similares entre ambas bases de datos durante el período en estudio a diferencia de la temperatura máxima en la Figura 3, donde se observa que los datos de análisis del CFSR subestiman a los datos de la estación local a partir del año 1979 hasta aproximadamente el año 2009. Estos resultados coinciden con el PBIAS (16.64), el cual indica un error de subestimación al ser un valor positivo. Zhang et al. (2020) obtuvieron resultados parecidos, en los cuales datos CMADS tuvieron un mejor desempeño que los datos del NCEP-CFSR para temperatura y precipitación diaria.

Para la V_v, en la Figura 5 se observan grandes diferencias entre ambos conjuntos de datos, siendo que las tendencias difieren altamente entre sí. Para el caso de la HR en la Fig. 6 los datos CFSR sobreestiman a los datos de la estación, coincidiendo con un PBIAS negativo (-12.96).

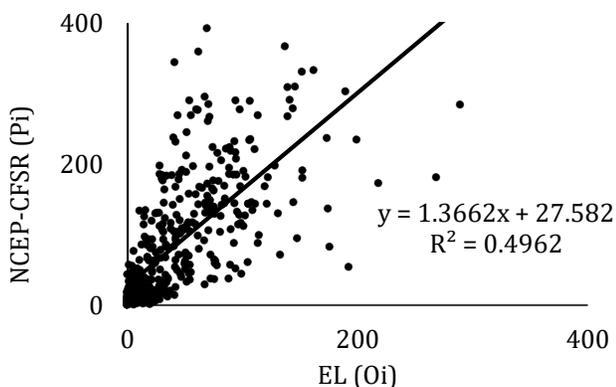


Figura 7. Comparación entre datos observados en la estación local (EL) (Oi) y datos de reanálisis NCEP-CFSR (Pi) para la Precipitación mensual (PP) (mm), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

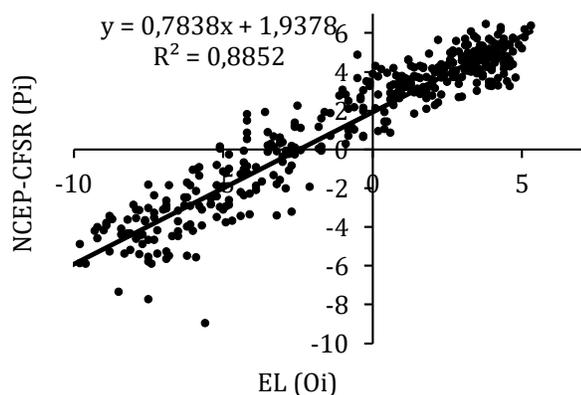


Figura 8. Comparación entre datos observados en la estación local EL (Oi) y datos de reanálisis NCEP-CFSR (Pi)

para la Temperatura mínima (T_{min}), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

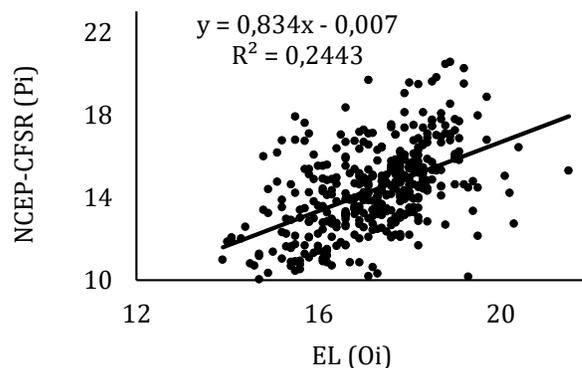


Figura 9. Comparación entre datos observados en la estación local (EL) (Oi) y datos de reanálisis NCEP-CFSR (Pi) para la Temperatura máxima (T_{max}), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

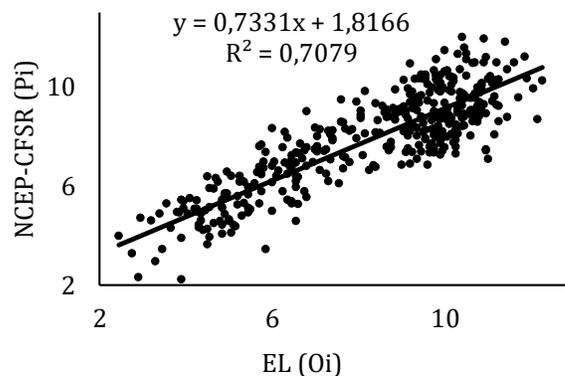


Figura 10. Comparación entre datos observados en la estación local (EL) (Oi) y datos de reanálisis NCEP-CFSR (Pi) para la Temperatura media (T_{med}), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

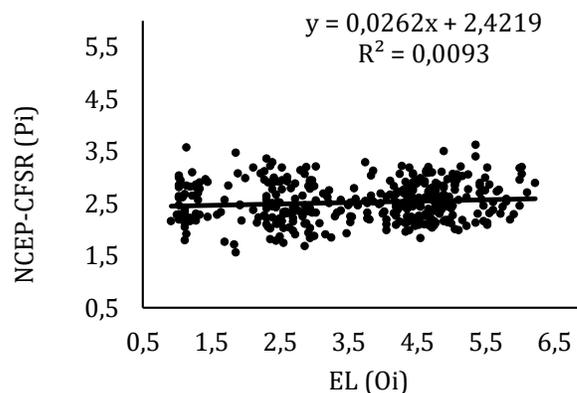


Figura 11. Comparación entre datos observados en la estación local (EL) (Oi) y datos de reanálisis NCEP-CFSR

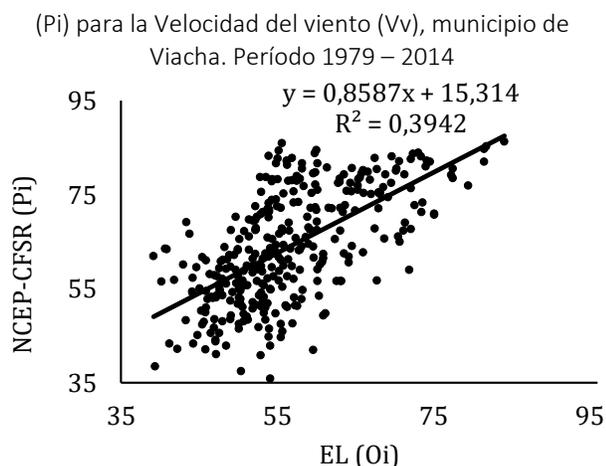


Figura 12. Comparación entre datos observados en la estación local (EL) (Oi) y datos de reanálisis NCEP-CFSR (Pi) para la Humedad relativa (HR), municipio de Viacha. Período 1979 – 2014

De acuerdo a las Figuras 7, 8 y 10 tanto la PP, Tmin y Tmed, presentaron los mayores valores para el coeficiente de determinación R^2 (0.50, 0.88 y 0.71 respectivamente), en comparación a las otras variables que obtuvieron valores menores a 0.5, considerado el valor mínimo “aceptable” para ser considerados aceptables según Moriasi *et al.* (2007). Mollericona *et al.* (2020) obtuvieron valores de R^2 iguales a 0.62, 0.78 y 0.68 para la temperatura mínima, media y máxima, respectivamente, también

considerados dentro de la categoría “aceptable”, para una región semiárida en Brasil. Para el caso de la precipitación, los mismos autores obtuvieron valores de 0.46, 0.55, 0.54 y 0.51 para R^2 , para 4 diferentes municipios en la misma región, observándose que se encuentran próximos al valor obtenido en el presente estudio.

En la Tabla 3, de acuerdo a la clasificación de Hopkins (2000), los mejores valores del coeficiente de correlación de Pearson r corresponden a la Tmin (0.94), PP (0.70) y la Tmed (0.84); por otro lado, la Vv (0.10) y Tmáx (0.49) tuvieron los menores desempeños de acuerdo a este indicador. Mollericona *et al.* (2020) también encontraron valores de r más altos –en comparación a las otras variables- para la Tmin (0.79) y la Tmed (0.88), y para la Tmax un valor de 0.82.

En relación al índice de desempeño c (Tabla 3), los mayores valores correspondieron a la Tmin y Tmed, siendo los menores correspondientes a la Tmáx y la Vv. Mollericona *et al.* (2020) obtuvieron valores para este indicador valores iguales a 0.67, 0.81 y 0.74 para la Tmin, Tmed y Tmax, respectivamente. En ambos estudios se observa que tanto la Tmin como la Tmed presentan valores mayores para los distintos indicadores, si se los compara con las otras variables.

Tabla 3. Valores de los indicadores de desempeño c y el coeficiente de Pearson r , y su respectiva clasificación

Par.	C	Clasificación	r	Clasificación
PP	0.47	Malo	0.70	Muy alto
Tmin	0.84	Muy Bueno	0.94	Casi perfecto
Tmax	0.21	Pésimo	0.49	Moderado
Tmed	0.76	Muy Bueno	0.84	Muy alto
Vv	0.04	Pésimo	0.10	Prácticamente cero
HR	0.43	Malo	0.63	Alto

Con relación al índice de Willmott (d) (Tabla 4), los valores más cercanos a la perfecta concordancia ($d=1$) fueron para la Tmin y Tmed (0.90), seguidos de la HR (0.68) y la PP (0.66), demostrando un alto grado de predicción libre de errores. Los valores de NSE más próximos a 1, valor que indica un ajuste perfecto, fueron alcanzados por la Tmin (0.64) y la Tmed (0.68). Por otro lado, la PP, Tmax, Vv y HR, obtuvieron valores negativos, siendo clasificados como “inaceptables” para este indicador. Eini *et al.* (2018) obtuvieron valores de 0.60 para el NSE en la escala mensual, durante el modelamiento hidrológico con el modelo SWAT y

datos CFSR. También Eini *et al.* (2019) encontraron que la precipitación local fue bien representada por datos CFSR-NCEP con un NSE de 0.91.

De acuerdo con los indicadores RMSE y MAE, la Tmin es la variable que presenta menor error en comparación a la Tmed y Tmax. El PBIAS, cuyo valor considerado óptimo es 0, obtuvo un mejor desempeño para la Tmed (4.64), seguido de la Tmax y la Vv; para el caso de la Tmin, el cálculo se vio afectado a causa de la presencia de datos con valores negativos. Para la PP y HR, se observa que los datos CFSR superestiman los datos observados; mientras

que, para la T_{min}, T_{max}, T_{med} y V_v, se observan valores positivos, indicando errores de subestimación por parte de los datos CFSR.

Blacutt *et al.* (2015); Silva *et al.* (2011) y Eichler y Londoño (2013) también encontraron que CFSR y MERRA sobrestimaron las precipitaciones a lo largo de las laderas orientadas hacia el este de los Andes, sobre la cuenca del Altiplano. En ese sentido, Eichler y Londoño (2013) indicaron que también se

debe tener precaución, especialmente en áreas de gran gradiente topográfico. Por otro lado, Khedhaouiria *et al.* (2020) como una alternativa, indican que el empleo de datos de reanálisis CFSR posprocesados, permite corregir el sesgo y el desajuste de escala con las observaciones, siendo esto posible también en sitios sin datos históricos, y mostrando una mejora significativa de la estimación métrica en comparación con datos CFSR sin posprocesamiento.

Tabla 4. Valores de los indicadores de desempeño *d*, NSE, RMSE, PBIAS y MAE para los diferentes parámetros en estudio

Par.	<i>d</i>	NSE	RMSE	PBIAS	MAE
PP	0.66	-1.91	88.14	-99.90	62.85
T _{min}	0.90	0.64	2.85	275.74	2.64
T _{max}	0.43	-6.59	3.68	16.64	3.53
T _{med}	0.90	0.68	1.57	4.64	1.49
V _v	0.46	-0.64	2.18	30.41	2.28
HR	0.68	-0.88	19.71	-12.96	26.57

Para Bressiani *et al.* (2015) un PBIAS $< \pm 10$ puede ser considerado como “muy bueno”, condición que se cumple para la T_{med}; y un $\pm 15 \leq$ PBIAS $< \pm 25$ se considera como “satisfactorio”, como el caso de la T_{max} y la HR; los demás rangos son considerados como “insatisfactorios”. Los mismos autores obtuvieron valores satisfactorios para el PBIAS al emplear datos CFSR en la simulación de diferentes métodos de evapotranspiración (ET). Para la V_v con un PBIAS igual a 30.41, se muestra una subestimación en función a este indicador, similares resultados concluyen con los encontrados por Çalışır *et al.* (2021), acerca de que datos CFSR como datos ERA5 subestiman la V_v.

CONCLUSIONES

El presente estudio abarcó el período de 1979 a 2014 y evaluó los datos meteorológicos de reanálisis proporcionados por el CFSR-NCEP comparándolos con datos de la estación local convencional del municipio de Viacha.

De acuerdo a los diferentes indicadores estadísticos empleados para el análisis las principales conclusiones obtenidas fueron que:

La precipitación mensual (PP), junto a la temperatura mínima (T_{min}) y la temperatura media (T_{med}), obtuvieron los valores más altos para el

coeficiente de correlación *r* y el coeficiente de regresión R². Para el índice de desempeño *c*, los valores más altos fueron alcanzados por la T_{med} y la T_{min}.

En el caso del índice de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), de forma semejante a los anteriores indicadores, destacaron la T_{min} y la T_{med}. Para el índice de concordancia de Willmott *d*, los más altos desempeños fueron para la T_{min} y T_{med}, seguidas por la HR y la PP.

Y finalmente, de acuerdo a los indicadores que miden el error como el Error Medio Absoluto (MAE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) los menores valores correspondieron a la T_{min}. Para el PBIAS, también obtuvieron desempeños aceptables tanto la T_{med}, la temperatura máxima (T_{max}) y la velocidad del viento (V_v).

En base a los diferentes indicadores estadísticos empleados, los datos de reanálisis proporcionados por el NCEP-CFSR presentan una predicción aceptable sólo para las variables T_{min} y T_{max} en el municipio de Viacha, La Paz, en comparación a las otras variables en estudio. De esta forma, el presente estudio contribuye a la evaluación de datos de reanálisis, especialmente en zonas con características similares y/o próximas al área en estudio.

AGRADECIMIENTOS

A el FACEPE y al Programa de Pos graduación de Engenharia Agrícola (PGEA) de la UFRPE, por la concesión de la beca de la primera autora, al SENAMHI y equipo de los NCEP-CSR por la disponibilidad de los datos en sus respectivos sitios oficiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Auerbach, D. A., Easton, Z. M., Walter, M. T., Flecker, A. S., & Fuka, D. R. (2016). Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics. *Hydrological Processes*, 30(19), 3466-3477. <https://doi.org/10.1002/hyp.10860>.

Blacutt, LA; Herdies, DL, de Gonçalves; L. G. G, Vila, D. A. y Andrade, M. (2015). Comparación de precipitaciones para los conjuntos de datos CFSR, MERRA, TRMM3B42 y Combined Scheme en Bolivia. *Investigación atmosférica*, 163: 117-131. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.02.002>.

Bao, X., & Zhang, F. (2013). Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *Journal of climate*, 26(1), 206-214. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00056.1>

Bressiani, D., Srinivasan, R., Jones, C. A., & Mendiondo, E. M. (2015). Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 125-139. <http://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/970>

Çalışır, E., Soran, M. B., & Akpınar, A. (2021). Quality of the ERA5 and CFSR winds and their contribution to wave modelling performance in a semi-closed sea. *Journal of Operational Oceanography*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2021.1911126>

Camargo, A. D., & Sentelhas, P. C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de agrometeorologia*, 5(1), 89-97. [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigo_s_sentelhas_1997/1997_RBAGro_5\(1\)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigo_s_sentelhas_1997/1997_RBAGro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf)

de Lima, J. A. G., & Alcântara, C. R. (2019). Comparison between ERA Interim/ECMWF, CFSR, NCEP/NCAR reanalysis, and observational datasets over the eastern part of the Brazilian Northeast Region. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3), 2021-2041. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02921-w>

Cunha, P. C. R. D., Nascimento, J. L. D., Silveira, P. M. D., & Alves Júnior, J. (2013). Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43, 114-122. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000200005>

Dile, Y. T., & Srinivasan, R. (2014). Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), 1226-1241. <https://doi.org/10.1111/jawr.12182>

Eichler, T. P., & Londoño, A. C. (2013). South American climatology and impacts of El Niño in NCEP's CFSR data. *Advances in Meteorology*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/492630>

Eini, M. R., Javadi, S., Delavar, M., Monteiro, J. A., & Darand, M. (2019). High accuracy of precipitation reanalyses resulted in good river discharge simulations in a semi-arid basin. *Ecological engineering*, 131, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.03.005>

Eini, M. R., Javadi, S., & Delavar, M. (2018). Evaluating the performance of CRU and NCEP CFSR global reanalysis climate datasets, in hydrological simulation by SWAT model, Case Study: Maharlu basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 32-44. http://iwrr.sinaweb.net/article_48378_en.html

Fuka, D. R., Walter, M. T., MacAlister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613-5623. <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>

Harmel, R. D., Smith, P. K., Migliaccio, K. W., Chaubey, I., Douglas-Mankin, K. R., Benham, B., ... & Robson, B. J. (2014). Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: A review and recommendations. *Environmental modelling & software*, 57, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.013>

Hopkins, W. G. (2 de febrero de 2021) *Correlation coefficient: a new view of statistics*. <https://www.sportsci.org/resource/stats/newview.html>

Khedhaouria, D., Mailhot, A., & Favre, A. C. (2020). Regional modeling of daily precipitation fields across the Great Lakes region (Canada) using the CFSR reanalysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(9), 1385-1405. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01722-x>

Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>

Lu, J. Z., Zhang, L., Cui, X. L., Zhang, P., Chen, X. L., Sauvage, S., & Sanchez-Perez, J. M. (2019). Assessing the climate forecast system reanalysis weather data driven hydrological model for the Yangtze River Basin in China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 3615-3632. : http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_36153632

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi: 10.13031/2013.23153) @2007

Mollericono, A. D. M., Lopes, I., Montenegro, A. A. A., & Leal, B. G. (2020). CFSR-NCEP Performance for weather data forecasting in the Pernambuco Semiarid, Brazil. *Dyna*, 87(215), 204-213. <http://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.89952>

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Paz, Y. M., Galvínio, J. D., de Holanda, R. M., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2018). Sensitivity analysis and calibration of the SWAT model for a basin in northeastern Brazil using observed and reanalysis climatic data. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(1), 371-389. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/65060991/236313_115622_1_PB.pdf?1606668780=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DRevista_Brasileira_de_Geografia_Fisica.pdf&Expires=

Plan de Desarrollo Municipal Viacha 2012-2016. 2012. Gobierno Autónomo Municipal de Viacha. La Paz- Bolivia. Consultado el 3 de febrero de 2021. Disponible en <http://autonomias.gobernacionlapaz.com/sim/municipio/pdm/viacha2012-2016.pdf>

Quadro, M. F., Berbery, E. H., Silva Dias, M. A., Herdies, D. L., & Gonçalves, L. G. (2013, May). The atmospheric water cycle over South America as seen in the new generation of global reanalyses. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 1531, No. 1, pp. 732-735). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.4804874>.

Quispe M. J. C. (2018). Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, departamento de La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(1), 99-105. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_artt_ext&pid=S2409-16182018000100012&lng=es&tlng=en.

Rocha, N. C. V., & Mendes, A. C. (2018). Análise de sensibilidade e calibração espacial do modelo SWAT aplicado em uma bacia do litoral pernambucano através de dados climáticos observados e de reanálise (Analysis of sensitivity and calibration of the SWAT model applied in a basin in northeast of Brazil using observed and reanalysis climatic data). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(1), 234-313. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.1.p234-313>.

Roth, V., & Lemann, T. (2016). Comparing CFSR and conventional weather data for discharge and soil loss modelling with SWAT in small catchments in the Ethiopian Highlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 921-934. <https://doi.org/10.5194/hess-20-921-2016>

Salio, P., Hobouchian, M. P., Skabar, Y. G., & Vila, D. (2015). Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, 163, 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.017>

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058., <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (10 de noviembre de 2020). <http://www.senamhi.gob.bo/sismet>

Silva, V. B., Kousky, V. E., & Higgins, R. W. (2011). Daily precipitation statistics for South America: An intercomparison between NCEP reanalyses and observations. *Journal of Hydrometeorology*, 12(1), 101-117. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1303.1>

Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the*

American Meteorological Society, 63(11), 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)

Zhang, D., Tan, M. L., Dawood, S. R. S., Samat, N., Chang, C. K., Roy, R., ... & Mahamud, M. A. (2020). Comparison of NCEP-CFSR and CMADS for hydrological modelling using SWAT in the Muda River Basin, Malaysia. *Water*, 12(11), 3288. <https://doi.org/10.3390/w12113288>