

GENERACIÓN DE PRODUCTOS COMBINADOS DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA CHOQUEYAPU, BOLIVIA

GENERATION OF COMBINED PRECIPITATION PRODUCTS IN THE CHOQUEYAPU BASIN, BOLIVIA

Fedra Alcalá¹, Jhonatan Ureña² y Oliver Saavedra³

ABSTRACT

This study focuses in hourly precipitation dataset generation during January 2021 and May 2023, integrating local meteorological data and remote sensing. At the initial analysis stage, the satellite-based product GSMaP.v6_NRT_Gauge showed overestimation when comparing with local rain gauges. After applying the proposed methodology, the correlation coefficients improved 39% within the time series, moving from 0.46 with satellite data to 0.65 corresponding to the fifth iteration (GS product). In this sense, it was showed a better coherence among rain gauge observations y combined product GS. Moreover, it was obtained a remarkable change regarding Nash and Sutcliffe Efficiency (NSE), moving from -2 to 0.43. The determination coefficient (R^2) improved from 0.21 to 0.42, considering that combined product shows spatial variability. Moreover, the Mean Absolute Error (MAE) was reduced from 0.08 to 0.03 and the RMSE from 0.37 to 0.16, decreasing average errors and deviations significantly. The applied methodology showed better results when analyzing periods with precipitation than periods without precipitation. These improvements at the indicators allow enough spatial and temporal resolution, to carry out flood analysis using hydrologic and hydrodynamic models.

Keywords: Hourly Precipitation, GSMaP, rain gauges, Choqueyapu basin

RESUMEN

Este estudio se enfoca en la generación de un producto de precipitación horaria para el período de enero 2021 a mayo 2023, integrando datos de estaciones meteorológicas locales y sensores remotos. En un análisis inicial, los datos satelitales del producto GSMaP.v6_NRT_Gauge mostraron sobrestimaciones al compararse con datos de estaciones locales. Después de aplicar la metodología de combinación propuesta, los valores en cuanto a la correlación (R) de la serie de tiempo incrementó en un 39%, pasando de un 0.46 con los datos satelitales a 0.65 correspondientes a la quinta iteración (producto GS). En este sentido, se ha mostrado una mayor coherencia entre las mediciones de estaciones y el producto combinado GS. Además, se obtuvo un cambio significativo respecto a la eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE), pasando de -2 a 0.43. El coeficiente de determinación (R^2) mejoró de 0.21 a 0.42, considerando que el producto combinado muestra la variabilidad espacial. Adicionalmente, se logró reducir el Error Medio Absoluto (MAE) desde 0.08 a 0.03 y el Error Cuadrático Medio (RMSE) de un inicial 0.37 a un final de 0.16, disminuyendo significativamente los errores promedio y las desviaciones. La metodología aplicada mostró mejores resultados al analizar periodos de tiempo que cuentan con un mayor registro de horas con precipitación con relación a aquellos que no registraron precipitación. Estas mejoras en los indicadores permiten una representación espacial y temporal suficiente en la cuenca del Choqueyapu, para realizar análisis de inundaciones usando modelos hidrológicos e hidrodinámicos.

Palabras clave: Precipitación Horaria, GSMaP, Pluviómetros, Cuenca Choqueyapu

¹ Estudiante en Ingeniería Civil – Investigadora Asistente (CIICA) - Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Privada Boliviana

² Licenciado en Ingeniería Civil – Investigador Asociado (CIICA) - Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Privada Boliviana

³ Doctor en Ingeniería Civil – director (CIICA) - Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Privada Boliviana

1. INTRODUCCIÓN

Bolivia han experimentado un crecimiento urbano acelerado en los últimos años, en especial en las ciudades, impulsado por la migración desde áreas periurbanas y rurales, por diferentes factores, económicos, laborales, etc. La Paz, en particular, se destaca como una de las ciudades clave del país y ha visto un crecimiento considerable debido a su importancia cultural y económica (Medinaceli, 2000). Situada en una compleja topografía de montañas y quebradas a gran altitud, esta expansión urbana enfrenta desafíos únicos y constantes para adaptarse a las limitaciones de su entorno natural. Estos desafíos, combinados con los efectos del cambio climático, fundan incertidumbre por las consecuencias que ya se están observando.

El cambio climático ha impulsado transformaciones sustanciales en los sistemas naturales, en los cuales los efectos relacionados con el agua destacan por su impacto directo en la sociedad. El incremento de la temperatura global, vinculado al efecto invernadero, está alterando los patrones de precipitación y modificando el ciclo hidrológico, lo que compromete la disponibilidad y calidad del agua. Además, los ecosistemas acuáticos y terrestres sufren cambios en su equilibrio, afectando la productividad agrícola y forestal. En este contexto, las variaciones de temperatura y presión atmosférica modifican la distribución de humedad y precipitación, generando condiciones de extrema sequía o lluvias intensas que ponen en riesgo tanto los sistemas naturales como los asentamientos humanos (Luis y Fernández, 2013).

Las lluvias intensas y concentradas, cada vez más comunes, representan una de las manifestaciones más críticas del cambio climático en regiones vulnerables. Estos eventos pueden elevar rápidamente los niveles de los ríos y generar desbordamientos, afectando tanto las zonas rurales como las urbanas. En el área rural, el exceso de agua suele arrasarse cultivos y ganadería, causando pérdidas económicas y de recursos naturales. Por otro lado, el impacto en las ciudades se centra en daños a infraestructuras como puentes, carreteras y viviendas en las zonas aledañas a cauces canalizados. Esta intensificación de fenómenos hidrometeorológicos resalta la necesidad de implementar medidas de planificación y ordenamiento territorial que permitan reducir los riesgos y proteger tanto el entorno natural como

las comunidades humanas (Arreguin y López, 2016).

La alta variabilidad de precipitaciones y un desarrollo urbano que continúa avanzando, han generado la necesidad de contar con sistemas que permitan el análisis detallado de la precipitación en la gestión de recursos hidrológicos.

La precipitación es una variable hidrológica que cuenta como característica la resolución espacial y temporal. La resolución espacial considera la representación gráfica de los valores de precipitación, teniendo características puntuales (estaciones pluviómetros) como distribuidas (productos grillados como radares y productos satelitales). La estimación de la distribución espacial de las precipitaciones en Bolivia representa un desafío significativo, dado su complejo relieve y la baja densidad de estaciones meteorológicas, en donde las herramientas más populares son los pluviómetros. Esto es más notable en regiones poco pobladas, zonas y áreas que carecen de una cobertura adecuada. Esta falta de estaciones no solo limita la comprensión de los regímenes de precipitación y su variabilidad espacial y temporal, sino que también obstaculiza el desarrollo de sistemas de seguimiento confiables en tiempo real (Aybar et al., 2017). Además, los fenómenos meteorológicos extremos pueden causar daños a los pluviómetros existentes, complicando así también su instalación y mantenimiento, por eso su activación dentro de zonas más pobladas y de entrada más asequible (Mantas et al., 2015).

En lo que concierne a la ciudad de La Paz, localizada en la cuenca del río Choqueyapu, este río principal nace a una altitud de 4500 metros sobre el nivel del mar y recorre 44 km cruzando la ciudad y siendo su río principal desde su fundación. La cuenca enfrenta cada vez con más frecuencia un aumento en los caudales y el arrastre de sedimentos durante las temporadas húmedas. Por esta situación, se han puesto en marcha estudios y proyectos para identificar amenazas, vulnerabilidades y riesgos que podrían impactar varios tramos del río y, por ende, la dinámica urbana. En el marco de estos estudios, se compiló una base de datos de precipitación histórica a partir de las estaciones disponibles. Sin embargo, se detectó que el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), a cargo de la red de estaciones en Bolivia, no contaba con estaciones cercanas a la cuenca. Como solución, se decidió recurrir a estaciones meteorológicas y pluviométricas de

otras organizaciones, planteando además la creación de estaciones sintéticas basadas en la malla meteorológica GMET (Wickel et al., 2019). Ante la resaltante necesidad de contar con fuentes de datos alternativas y validadas para garantizar una gestión eficaz de los recursos hídricos en contextos vulnerables, se encuentra la medición de precipitación a través de sensores satelitales da como resultado productos de precipitación basados en satélites (SBP. Estos productos presentan un carácter grillado (imágenes formadas por pixeles) de diferentes dimensiones; resultante del procesamiento de información recopilado de diferentes sensores a bordo de satélites, algoritmos computacionales de alta potencia y, en algunos casos, datos de estaciones meteorológicas o pluviométricas.

Varios de estos productos presentan libre acceso a sus datos para su manejo en diferentes estudios; sin embargo, una condicional que radica en todos estos es que son estimaciones de precipitación que no captura los datos reales que caen a tierra, siendo susceptibles a afectaciones relaciones a la curvatura y relieve de la superficie terrestre (Blacutt et al., 2015).

Debido a ello, se desarrolló un enfoque alternativo para combinar positivamente las fortalezas de dos fuentes de datos de precipitación: observaciones de superficie y estimaciones satelitales. Las observaciones de superficie carecen de cobertura espacial y temporal, mientras que las estimaciones satelitales exhiben una gran cobertura espacial y temporal, pero carecen de precisión absoluta. Se puede obtener un esquema para extraer sus respectivas ventajas combinando apropiadamente las estimaciones de pluviómetros y satelitales (Wickel et al., 2019) permitiendo mejorar la precisión de los datos satelitales manteniendo sus características espaciales, siendo la metodología de generación por iteración una de las más probadas en Bolivia en resoluciones diarias en sus tres macrocuencas (Saavedra y Ureña, 2022).

Adicionalmente, esta metodología fue implementadas estudios de modelación hidrológica en algunas cuencas priorizadas como Rocha para el analisis de su caudal ecologico (Achá, Saavedra y Ureña 2022) o Guadalquivir, en donde se implemento el modelo HydroBID como una nueva herramienta (Saavedra, Ureña y Perales 2023). No obstante, no existen estudios similares en la cuenca Choqueyapu con precipitación a una escala diaria, más aún

tampoco en resolución horaria que es requerida para el análisis de tormentas.

El objetivo de este estudio es analizar la metodología de combinación de productos de precipitación pluviométrica y satelital a escala temporal horaria, para la Cuenca de Choqueyapu.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Choqueyapu está ubicada dentro del departamento de La Paz, siendo su río principal, que proviene de los constantes deshielos de las cumbres nevadas de Chacaltaya, ubicadas en la Cordillera de Chucura a una altitud de alrededor de 5500 msnm, como se observa en la Figura 1.

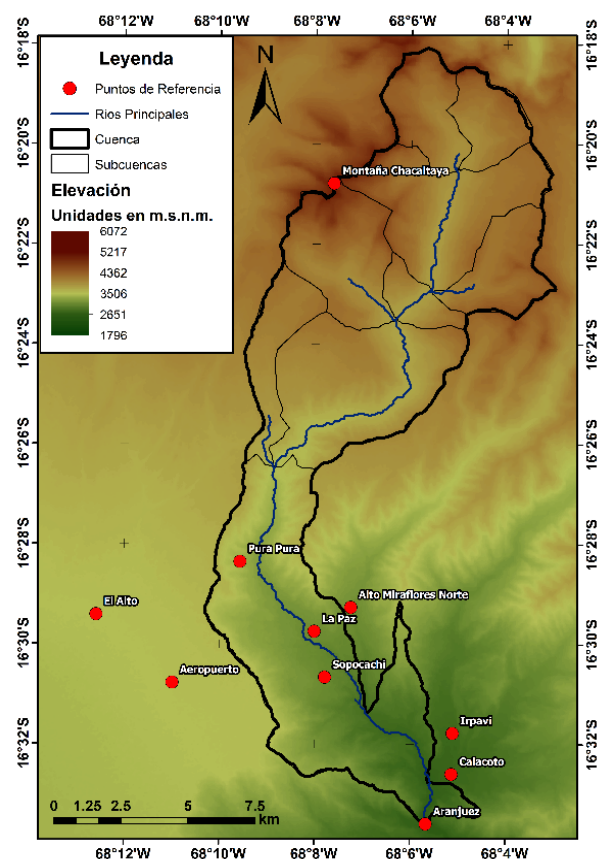


Figura 1. Mapa de elevación de la cuenca Choqueyapu. *Elaboración propia.*

Sus aguas son ocasionalmente captadas para su tratamiento y suministro en la zona central al ingresar a la ciudad por la región de Achachicala en el norte. Atraviesa zonas industriales, residenciales y comerciales donde recibe descargas de aguas residuales sin tratamiento, lo que causa problemas estéticos y de contaminación (Ayala Ticona et al., 2022).

Atravesando igual los principales macrodistritos importantes, como Centro, Zona de Sopocachi, Obrajes y terminando en Calacoto, a 3200 m.s.n.m. Esto se puede observar en la Figura 2.

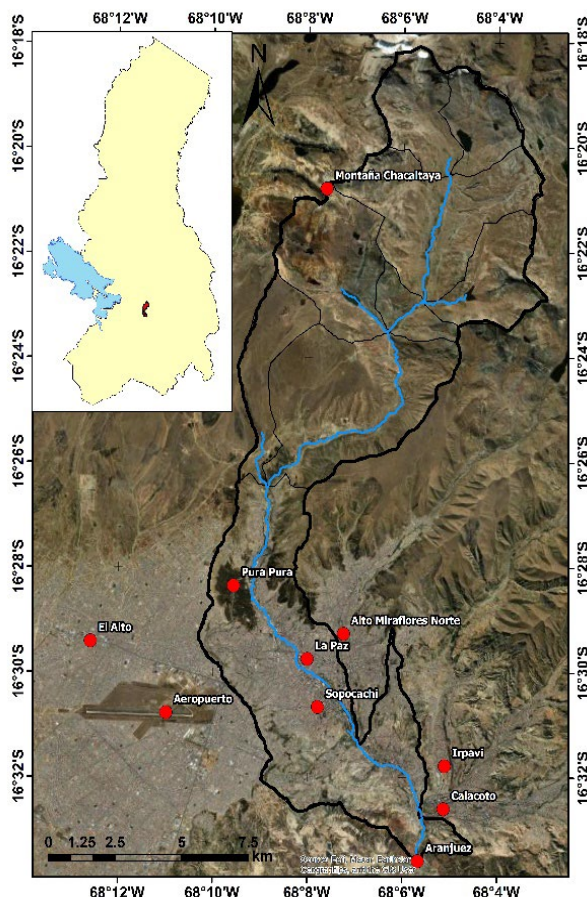


Figura 2. Mapa de referencia de puntos clave en la cuenca Choqueyapu. *Elaboración propia.*

Debido a su ubicación, la cuenca Choqueyapu presenta aspectos de manejo e implementación de acciones para provisión y mejoramiento de los servicios de agua potable y saneamiento básico; el sistema de drenaje pluvial de la zona urbana, y la caracterización de las cargas contaminantes y de calidad de agua en estos cuerpos de agua, fuera de la ciudad es utilizada para la agricultura y riego. Varios segmentos del río, mientras recorre la ciudad de La Paz, presenta canalización embovedada llegando a extenderse a aproximadamente 14 km y pasando por el centro histórico, posteriormente ya en muchos segmentos solamente se encuentra canalizado (Ayala Ticona et al., 2022).

El interés en esta cuenca proviene de su relevancia en el país y la fragilidad de varias construcciones ante eventuales inundaciones

que ponen en peligro la ciudad. Recientemente, en marzo de 2024, diferentes macrodistritos de la zona sud sufrieron inundaciones del río, provocando desbordes debido a la fuerza del agua y la obstrucción de diversas rutas (Caos en La Paz: tormenta y desborde en calles siembran temor y arrastran autos, 2024). Investigaciones anteriores abarcaron el desarrollo de mapas de riesgo y la implementación de sistemas de alerta temprana, brindando a los gestores de amenazas diversas herramientas de intervención frente a episodios de lluvias intensas que, en temporada húmeda, exceden los 100 mm/día. Sin embargo, el monitoreo de estos sistemas se ha limitado al uso de estaciones meteorológicas que ahora funcionan como puntos de control.

3. METODOLOGÍA

Esta parte especifica los procedimientos esenciales para el manejo e interpretación de datos en la cuenca Choqueyapu. Primero, se presentan las estaciones pluviométricas disponibles; después, se detallan los productos de procedencia satelital empleados. A continuación, se presenta el método de combinación utilizado para lograr el producto híbrido con resolución horaria para la zona de estudio.

3.1. Estaciones Pluviométricas

El uso de estaciones pluviométricas es esencial para realizar un estudio hidrológico histórico de una cuenca. Así, tener más estaciones permite obtener una representación más dispersa de la distribución de las lluvias en el área de análisis.

En la cuenca Choqueyapu, existen múltiples estaciones de temperatura y registro de precipitaciones, cuyos datos se hallan gestionados por diferentes entidades como: SENAMHI, EPSAS (Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento) y el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP). Sin embargo, el análisis de riesgos requiere un acceso continuo a dicha información y, adicionalmente, se encuentre a una escala temporal horaria, un requisito que en la actualidad solo satisface GAMLP. La base de datos pública de SENAMHI se actualiza cada mes; en cambio, es necesario solicitar los registros de EPSAS de manera constante. En consecuencia, de las más de 20 estaciones existentes, únicamente 13 poseen información para el periodo 2021-2023, tal como se muestra en la Figura 3.

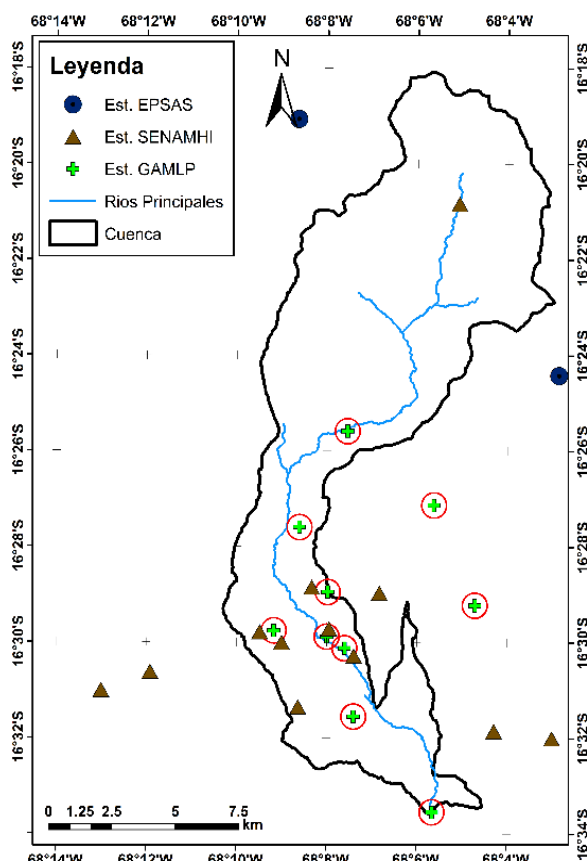


Figura 3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas disponibles para la cuenca Choqueyapu. *Elaboración propia.*

3.2. Precipitación por Sensores Satelitales

Los radares terrestres y los productos de precipitación satelital son alternativas para enriquecer la información de las estaciones pluviométricas, ambos con una resolución espacial en forma de grilla (tamaño según el producto).

Los radares terrestres suelen proporcionar una precisión superior a los productos satelitales; sin embargo, el acceso a estos datos se encuentra restringido debido a los elevados gastos de instalación, funcionamiento y conservación que estos sistemas demandan. Por otro lado, los productos de precipitación satelital presentan una mayor accesibilidad debido a la gran disponibilidad de fuentes. Dentro de estos productos, la línea de productos satelitales Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) presentan una diversidad de productos entre ellos GSMaP_MVK, GSMaP_Gauge, GSMaP_NRT y GSMaP_GREV que fueron empleados en estudios previos relacionados en análisis de precipitación en Bolivia (Ureña,

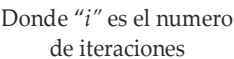
Saavedra y Kubota, 2021). No obstante, los productos anteriores presentan un periodo de 3 días para acceder a su información, debido a un factor de reanálisis. El producto GSMaP_NRT (Near-Real Time) fue creado para manejar datos horarios y con actualizaciones cada 4 horas, perfecto para el estudio de eventos extremos, tormentas, análisis de inundaciones y la emisión de alertas.

En contraposición a otras versiones, el NRT evita el reanálisis para proporcionar un acceso más veloz a la información. No obstante, la versión GSMaP_NRT_Gauge conserva la misma velocidad de procesamiento e incorpora información de la red de pluviómetros que son utilizados en GSMaP_Gauge. Debido a este factor, se empleó la versión GSMaP.v6_NRT_Gauge para este trabajo.

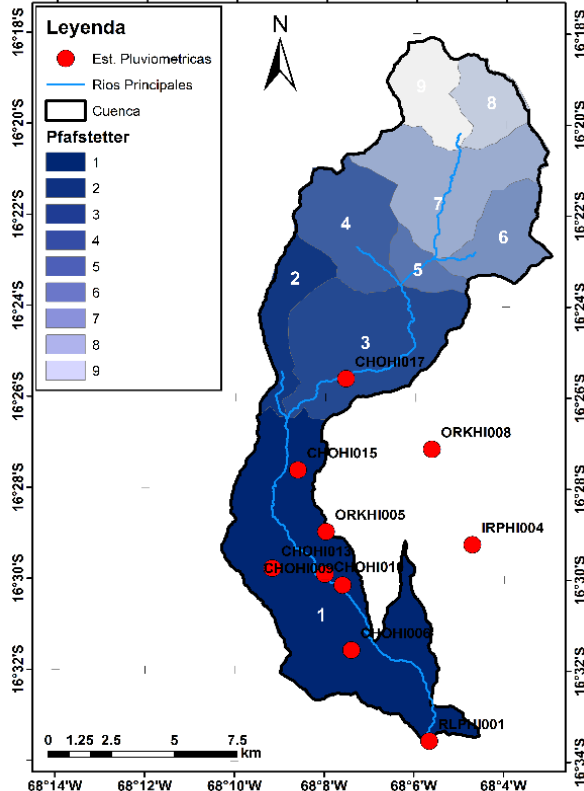
3.3. Precipitación Combinada

El concepto de precipitación combinada se refiere a un método que permite crear un nuevo conjunto de datos o "producto" de precipitación, que combina datos precisos de estaciones en tierra con datos satelitales, los cuales ofrecen una cobertura espacial más amplia y detallada en forma de grilla. La idea es aprovechar la precisión de los datos puntuales de las estaciones y la extensión de los datos satelitales para cubrir toda la cuenca.

Para lograr esta combinación, se utiliza una metodología iterativa. En cada iteración, se ajustan las posibles sobreestimaciones o subestimaciones de los datos satelitales. Esto se realiza calculando el error relativo entre los datos de las estaciones, previamente interpolados, y el producto satelital. Una vez obtenido este valor, se procede a calcular un promedio en base a un mapa de subcuencas. Con el promedio, es necesario calcular un factor de ajuste que permita disminuir el error relativo. Ante su característica iterativa, este proceso de ajuste se repite hasta que se alcanza una convergencia que es obtenida cuando se alcanza un error relativo menor al $\pm 5\%$, lo cual significa que las diferencias entre los dos conjuntos de datos son mínimas y aceptables. La metodología empleada se explica en la Figura 4. Para el caso de estudio, el área de estudio fue segmentada en nueve subcuencas empleando el método de Pfafstetter (Figura 5). Estas subcuencas han sido utilizadas esencialmente como unidades de control, como instrumentos de análisis y control durante la producción del producto combinado.



Alcalá y Saavedra, 2024.



Choqueyapu. *Elaboración propia.*

4. RESULTADOS

En la Tabla 1, los indicadores estadísticos reflejan la mejora lograda con el proceso iterativo para la generación del producto combinado de precipitación. El coeficiente de determinación (R^2) de GSMaP muestra inicialmente valores bajos en todas las subcuencas, indicando que los datos satelitales tienen una capacidad limitada para representar la variabilidad observada en los registros pluviométricos. En la iteración final (v5) desde ahora llamada GS, sin embargo, se incrementa la correlación con los datos de referencia en un 94.88%, lo cual refleja una aproximación mucho más precisa respecto a los datos observados.

El error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) iniciales de GSMap presentan también una diferencia notable respecto a los datos pluviométricos, reflejando un desempeño subóptimo en precisión. A través del proceso de combinación, GS logra reducir el MAE en un 65.43% y el RMSE en un 56.15%, señalando que la versión final logra valores más cercanos a los observados, con una precisión y consistencia significativamente mejoradas.

Asimismo, los indicadores de correlación (R) experimentan una mejora progresiva, con GS alcanzando una relación fuerte con los datos de referencia, incrementando la correlación en un 39.44% respecto a GSMap original.

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de GSMap inicial, que presentaba un desempeño negativo indicando baja fiabilidad, se transforma en v5 alcanzando valores positivos y adecuados para su uso en estudios y aplicaciones operativas, con un aumento de eficiencia del 121.28%. En conjunto, estos resultados demuestran que la metodología iterativa no solo mejora cada uno de los indicadores clave de desempeño, sino que establece al producto combinado GS como una herramienta precisa y confiable para aplicaciones relacionadas con la precipitación en la cuenca.

Tabla 1. Indicadores Estadísticos de los resultados de la metodología de combinación. *Elaboración propia.*

	R ²	R	MAE	RMSE	NSE
GSMap	0.21	0.46	0.08	0.37	-2.00
v1	0.27	0.52	0.04	0.19	0.25
v2	0.32	0.56	0.03	0.18	0.30
v3	0.36	0.60	0.03	0.17	0.36
v4	0.36	0.60	0.03	0.17	0.36
v5 (GS)	0.42	0.65	0.03	0.16	0.43

Cabe destacar que cada indicador presenta un grado de mejora variable a lo largo de las diferentes iteraciones del proceso. En la Figura 5, se puede observar el porcentaje de mejora de cada indicador en cada transición de versión. En términos de NSE, se registra la mayor mejora

acumulada al pasar de GSMap a la versión 1, con un notable aumento del 113%. Sin embargo, las mejoras se desaceleran en las versiones posteriores, con incrementos más modestos de 20% de la versión 1 a la 2, y del 20% de la 2 a la 3, para finalizar con un 17% al llegar a la 5ta iteración.

En contraste, R² muestra la menor mejora acumulada, comenzando con un incremento del 26% de GSMap a la versión 1, pero luego con una desaceleración significativa, donde no se observa mejora de la versión 3 a la 4.

Los otros indicadores, como el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE), también evidencian una tendencia similar. En el caso del MAE, la mejora más alta es del 56% de GSMap a la versión 1, pero se reduce drásticamente a incrementos de solo 4% de la versión 1 a la 2 y 12% de la 4 a la 5. Por su parte, el RMSE presenta una disminución del 50% de GSMap a la versión 1, con aumentos menores en las versiones posteriores, donde la mejora se limita a un 5% al llegar a la versión 5 (GS). Estos resultados resaltan la importancia de la Eficiencia de Nash como el indicador con mayor capacidad de mejora, mientras que el coeficiente de determinación indica que, aunque se ha logrado un avance, aún existe una limitación en la capacidad del modelo para replicar los datos observados.

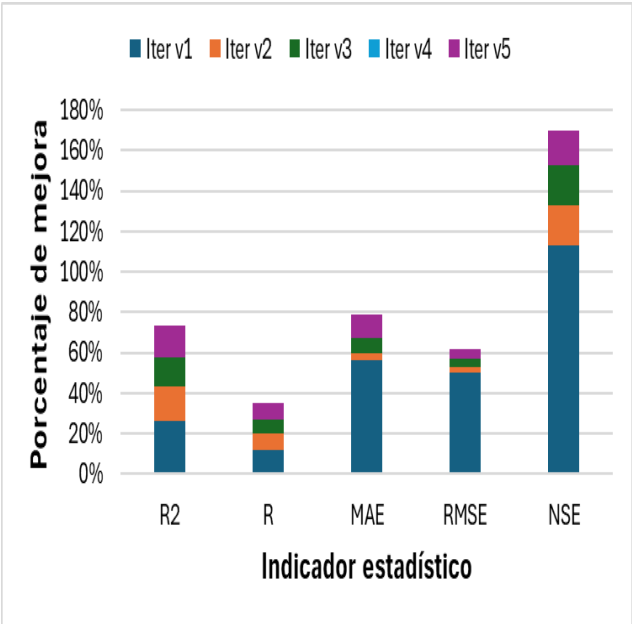


Figura 6. Grafica de porcentaje de mejora acumulada para indicadores estadísticos usados. *Elaboración propia.*

Los resultados del proceso de generación de precipitación media se ilustran en la Figura 7, donde se comparan los mapas de precipitación promedio horaria obtenidos de las estaciones pluviométricas, GSMaP y el producto combinado

GS. Los datos de las estaciones pluviométricas, utilizados como referencia, reflejan una diferencia significativa en la precipitación máxima en comparación con los productos satelitales.

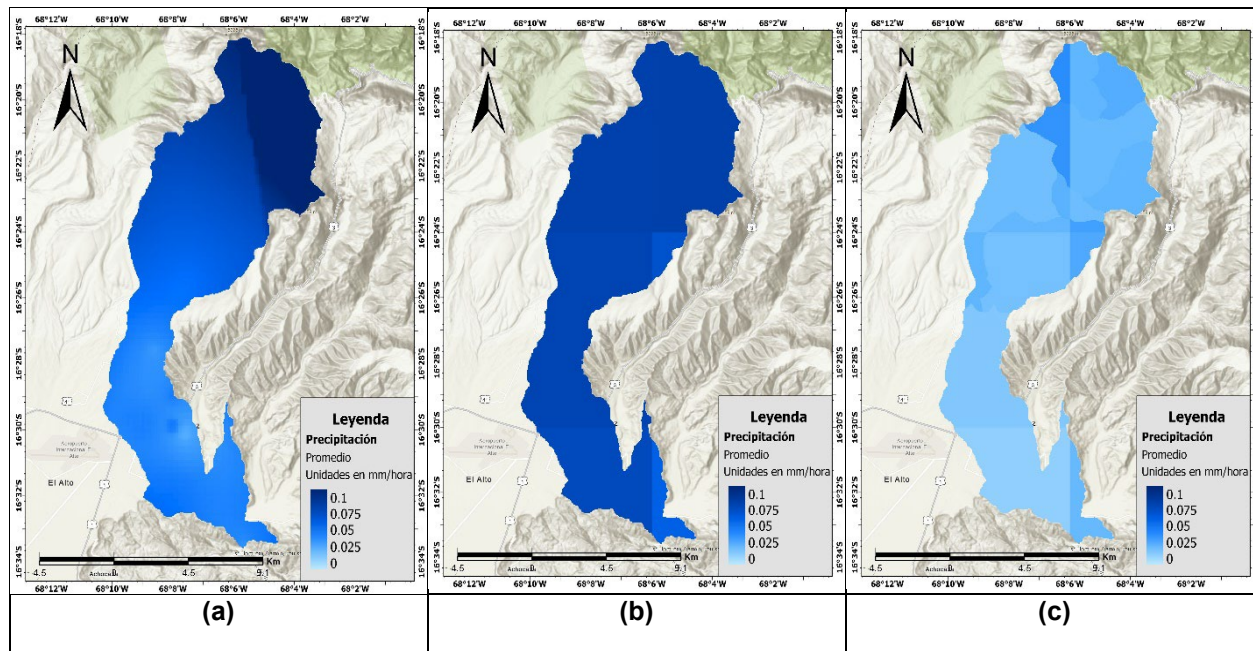


Figura 7. Mapa de precipitación promedio horaria del periodo 2021-2023 para la cuenca Choqueyapu siendo: a) Estaciones Pluviométricas, b) GSMaP y c) GS. *Elaboración propia*

Esta variabilidad indica la diferencia entre las dos diferentes fuentes de datos. Por otro lado, los valores de GSMaP presentan una considerable subestimación en comparación con los datos pluviométricos, lo que se traduce en diferencias notables tanto en las precipitaciones máximas como mínimas. Asimismo, el producto combinado GS muestra una subestimación similar, lo que es atribuible a la forma en que se calculan los promedios, ya que la alta frecuencia de horas sin lluvia afecta significativamente estos valores. Es importante señalar que el mapa de GSMaP se conforma por una cuadrícula de 6 píxeles de $0.1 \times 0.1^\circ$ (aproximadamente 10×10 km), lo que limita la capacidad de resolución espacial y contribuye a la baja variabilidad observada.

Dada esta situación, se ha optado por realizar un análisis por escenario que permitirá una mejor comprensión de la variabilidad en la precipitación durante episodios de lluvia específicos.

En este sentido, se presentará un gráfico de serie de tiempo correspondiente a un día particular durante la temporada de lluvias, Figura 8. En donde se comparan cuatro líneas representativas de diferentes fuentes de datos: la primera corresponde a las mediciones de pluviómetros, la

segunda a los datos de GSMaP y la tercera al producto combinado en su primera versión y la cuarta al producto combinado en su última versión. La línea de pluviómetros se caracteriza por mantenerse consistentemente en la parte del medio del gráfico, exceptuando un tramo dentro de la hora donde se muestra muy superior a las otras líneas, reflejando mediciones directas y típicamente más altas de precipitación en comparación con las otras tres.

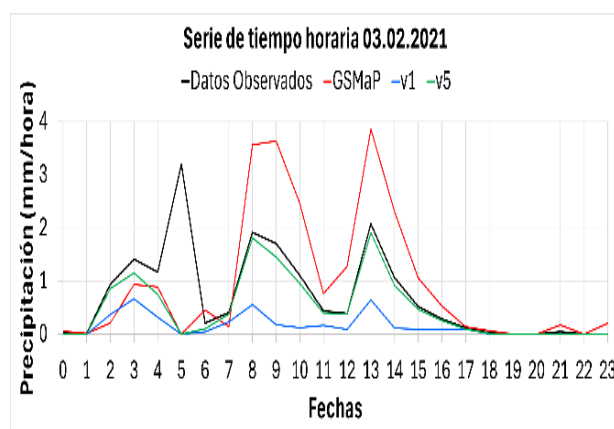


Figura 8. Serie de tiempo horaria para las precipitaciones promedio del 03/02/2021 en la cuenca Choqueyapu. *Elaboración propia.*

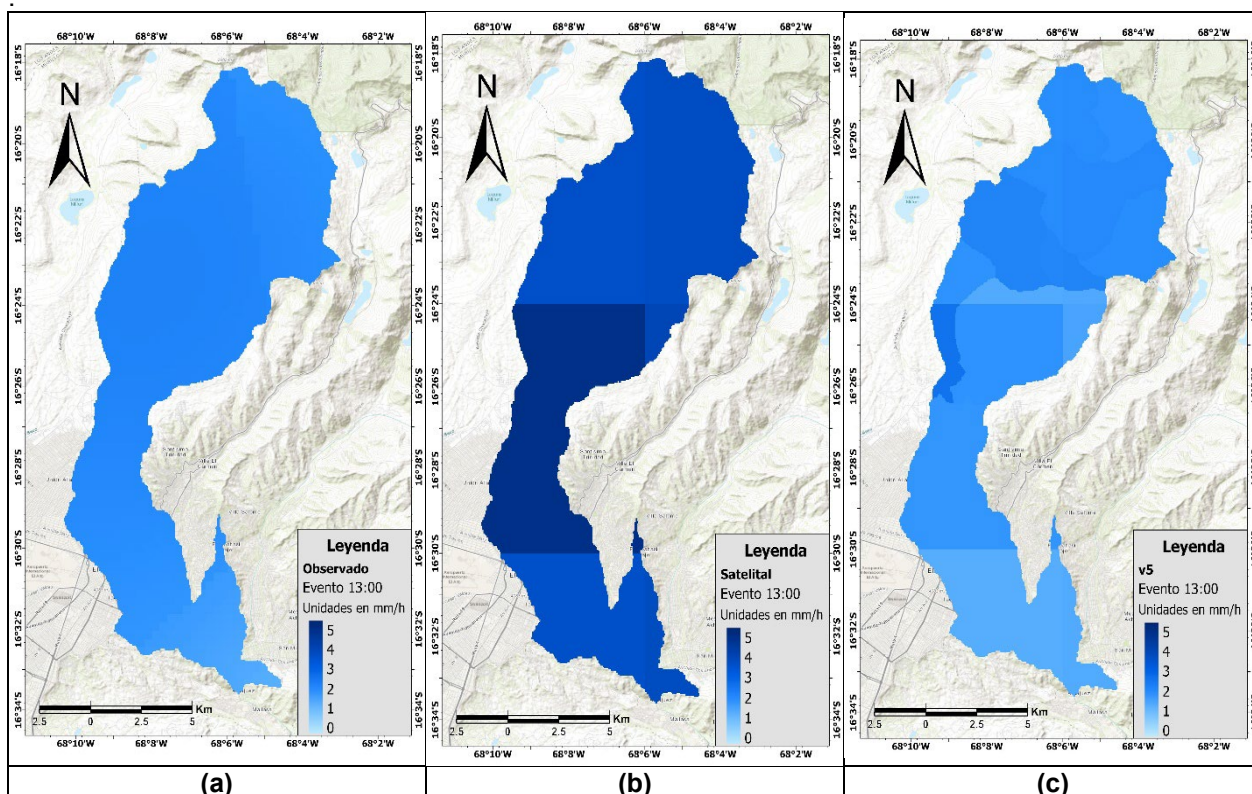


Figura 9. Mapa de precipitación para las 13:00 del 03/02/2023 para la cuenca Choqueyapu siendo: a) Estaciones Pluviométricas, b) GSMaP y c) GS. *Elaboración propia.*

Por otro lado, la línea de GSMaP exhibe variaciones que oscilan la línea de pluviómetros y las de los productos, lo cual es característico de las variaciones inherentes a los datos satelitales, observándose una sobrestimación a la mitad del periodo de análisis. Durante el proceso de generación de productos combinados, la primera versión del producto presenta una severa subestimación de valores, compartiendo con los demás datos únicamente el comportamiento en ciertas partes. En contraste, la línea del producto combinado en su última versión sigue la tendencia general de los pluviómetros, pero se encuentra posicionada más abajo pero muy cerca en relación con ellos, exceptuando en una parte donde se parece más al dato satelital.

En la serie de tiempo comparativa, se destacan las horas de 11:00 a 15:00, periodo en el que se observa un evento de alta precipitación, alcanzando su punto máximo a las 13:00 (Figura 9). En esta hora específica, la precipitación estimada por GSMaP es considerablemente mayor que la registrada por los pluviómetros y la versión final (GS) del producto combinado. Sin embargo, lo que resulta más relevante es que GS se aproxima más a la curva de los datos pluviométricos, lo cual indica su capacidad para

replicar de manera más fiel la variabilidad observada en la realidad.

A lo largo del evento, GSMaP exhibe un aumento notable de precipitación en el tramo central, lo que refleja una mayor intensidad en su estimación. El producto GS, aunque presenta mayor variabilidad horaria, mantiene una menor dispersión en sus diferencias de precipitación, lo que permite una aproximación más uniforme y cercana a las mediciones de los pluviómetros. Esto destaca la capacidad de GS para moderar la sobrestimación observada en GSMaP y lograr una correspondencia más estable y precisa con los datos de referencia.

Adicionalmente, se han preparado gráficos de dispersión para comparar la evolución de la primera iteración hasta la quinta. En la Figura 10, se observa que los datos de GSMaP están consistentemente por encima de la línea de tendencia, mostrando pocos valores por debajo de esta; mientras que los datos de la iteración v1 se distribuyen principalmente por debajo de esta línea, mostrando casos de subestimación crítica en relación con los valores observados (Panel a). Por otro lado, los datos de la iteración v5 (GS) muestran una tendencia a una menor

subestimación en valores bajos y con mayor acercamiento a la línea de tendencia, demostrando el efecto positivo de esquema de corrección aplicado.

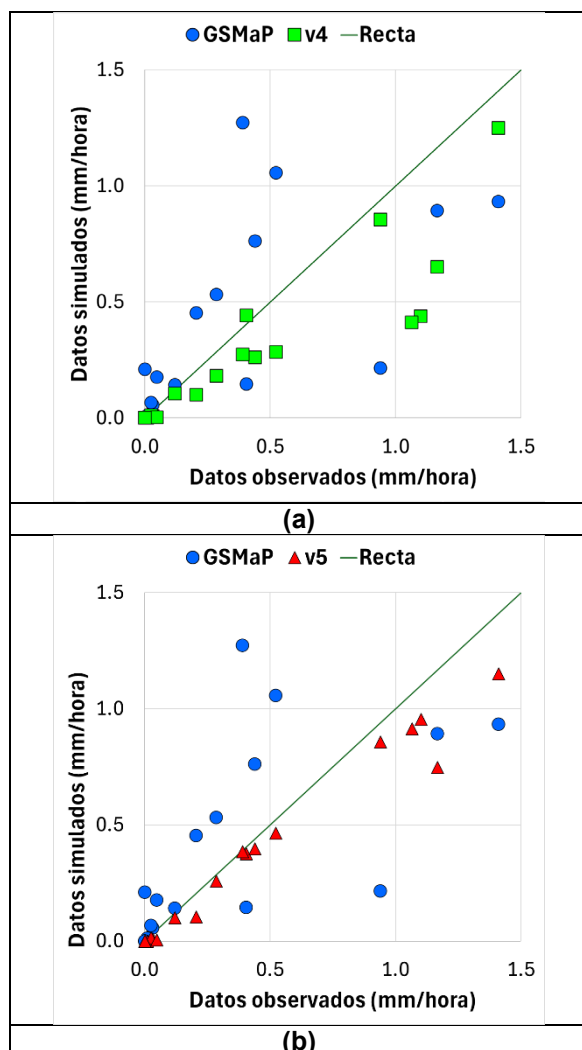


Figura 10. Diagramas de dispersión entre datos observados, GSMaP con relación a: a) Primera Iteración (v1) y b) Producto Combinado GS (v5). *Elaboración propia.*

5. CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló un producto combinado de precipitación horaria a partir de datos pluviométricos y sensores a bordo de satélites, empleando una metodología iterativa de combinación. Se utilizó el producto GSMaP.v6_NRT_Gauge para el periodo enero 2021 a mayo 2023, con una resolución temporal horaria.

Después de cinco iteraciones aplicando factores de corrección, se lograron mejoras significativas, se llegó a la convergencia aceptables para la

metodología. Inicialmente el producto satelital GSMaP presentaba una correlación de 0.46, alcanzando el valor de 0.65 en la iteración final, lo que significa que los valores hallados representan bien la variabilidad de los datos observados. En cuanto a la eficiencia de Nash y Sutcliffe, el producto GSMaP inicialmente mostraba un valor negativo, indicando que la base de datos no era comparable ni sustituible con la pluviométricas. Tras el proceso de generación el nuevo producto llegó a una eficiencia de 0.43, un valor aceptable que permite cierta semejanza con la base de datos observada (pluviométrica). En el caso de los errores, muestran mejoras de más del 30 y 40% llegando a valores del 0.03 en el error medio absoluto y a 0.16 en el error cuadrático medio, valores muy cercanos a 0, ideales.

A través del análisis de las series de tiempo, se observó que la metodología resulta más efectiva en periodos que presentan de lluvia; esto se debe a que, en horas sin precipitación observadas, el producto satelital GSMaP tiende a reflejar valores de cero horas antes y después, lo que afecta la precisión del producto combinado.

En base a los gráficos de dispersión, los datos de GSMaP están consistentemente por encima de la línea de tendencia, con pocos valores por debajo mostrando tendencias a la sobrestimación de información en caso de registrarse precipitación observada. Por su parte, el proceso de combinación iterativa muestra, a través de la primera iteración, una fuerte tendencia a la subestimación que, al momento de llegar a la quinta (producto GS) se llegan a subsanar mostrando ligeras subestimaciones con relación a los datos observados.

Según los resultados obtenidos, el proceso de la generación del producto GS se observó que el tamaño de la grilla del producto satelital es importante. En este caso la cuadrícula abarcaba aproximadamente 10 x 10 km, en relación con el área total de la cuenca es una cuadrícula grande. La influencia se veía más en cuestión a los días con valores 0 (ausencia de lluvia), que llegaban a bajar mucho a los valores de los productos a la hora de la combinación de datos, lo que limitaba el desenvolvimiento de los datos terrestres.

El producto combinado horario podría ser empleado para el análisis de tormentas, inundaciones y sistemas de alerta temprana; permitiendo contar con una nueva fuente de datos de precipitación. También se puede aplicar

la metodología propuesta con otros productos satelitales de precipitación.

6. BIBLIOGRAFÍA

Achá, N. A., Saavedra, O. C., & Ureña, J. E. (2022). Modelación hidrológica en la cuenca del río Rocha incorporando lineamientos de caudal ecológico. *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-5i>

Arreguín, F., & López, M. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(5). <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n5/2007-2422-tca-7-05-00005.pdf>

Ayala Ticona, G., Soto Trujillo, A., Esquivel N., N., Liera, C., Coleoni, C., Forero, T., Maunter, M., Mancada, A., & Santos, T. (2022). *Planificación hídrica de la Cuenca Alta del Río La Paz*. <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2023/05/pdc-la-paz-bw.pdf>

Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe, O. (2017). *Uso del producto grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>

Blacutt, L. A., Herdies, D. L., de Goncalves, L. G. G., Vila, D. A., & Andrade, M. (2015). Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and Combined Scheme datasets in Bolivia. *Atmospheric Research*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.02.002>

Caos en La Paz: tormenta y desborde en calles siembran temor y arrastran autos. (2024, 20 de marzo). *Opinión*. <https://www.opinion.com.bo/articulo/pais/temor-paz-lluvias-granizo-desborde-calles-siembran-temor-arrastran-autos/20240320175632940346.html>

Luis, J., & Fernández, U. (2013). EL CAMBIO CLIMÁTICO: SUS CAUSAS Y EFECTOS MEDIOAMBIENTALES CLIMATE CHANGE: CAUSES AND ENVIRONMENTAL EFFECTS. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/23839/ARAMCV-2013-50-cambio-climatico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mantas, V. M., Liu, Z., Caro, C., & Pereira, A. J. S. C. (2015). Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. *Atmospheric Research*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.012>

Medinaceli, X. (2000). La Paz, ciudad de cerros o de ríos? *Revista Ciencia y Cultura*. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-33232000000100008&nrm=iso

Saavedra, O., & Ureña, J. (2022). Generation of Combined Daily Satellite-Based Precipitation Products over Bolivia. *Remote Sensing*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/rs14174195>

Saavedra, O., Ureña, J., & Perales, M. (2023). Implementation of HydroBID Model with Satellite-Based Precipitation Products in Guadalquivir Basin, Bolivia. *Water*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/w15183250>

Ureña, J., Saavedra, O., & Kubota, T. (2021). The Development of a Combined Satellite-Based Precipitation Dataset across Bolivia from 2000 to 2015. *Remote Sensing*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/rs13152931>

Ureña, J. E., Alcalá, F. V., & Saavedra, O. C. (2024). Generación de un producto de precipitación diaria para la cuenca Choqueyapu en la ciudad de la Paz. *Revista Investigación & Desarrollo*, 24(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.024.1-4i>

Wickel, A., Ghajarnia, N., Yates, D., Newman, A., Escobar, M., Prkey David, Lima, N., Escalera Ana Cecilia, & von Kaenel, M. (2019). *Developing a gridded high-resolution gauge based precipitation product for Bolivia*. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-18457-1.pdf>