

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN MEDIANTE MEDICIONES HIDROLÓGICAS EN UNA CUENCA DE ALTA MONTAÑA

Zapata, R.^a, Hernández, C.^b

^a Investigador en el área de recursos hídricos del Instituto de Aguas de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: zapata.ronald@usfx.bo

^b Docente en el área de recursos hídricos de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: hernandez.corina@usfx.bo

Recibido: 30/09/2022

Aceptado: 06/10/2022

Publicado: 07/11/2022

RESUMEN

El tiempo de concentración (T_C) es un parámetro hidrológico esencial para estimar caudales pico y diseñar obras hidráulicas, cuya precisión depende de las condiciones fisiográficas y climáticas locales. Este estudio evalúa la aplicabilidad de cinco métodos empíricos (Kirpich, Giandotti, Témez, SCS, y Passini) en la cuenca de alta montaña Kaynacas (Bolivia), contrastándolos con valores de T_C y tiempo de desfase (T_L) obtenidos a partir de hidrogramas construidos con datos observados de precipitación y caudal. La precipitación efectiva se estimó mediante el método del índice ϕ y el análisis de pérdidas iniciales. Los resultados muestran una variabilidad moderada entre métodos, con un T_C medio empírico de 2,76 h y un T_C observado de 3,66 h, es decir, aproximadamente 30 % mayor. Las ecuaciones que integran flujo superficial y de canal (Giandotti y Témez) presentaron la mejor correspondencia con los valores observados, mientras que Kirpich y Passini tendieron a subestimar el T_C . La relación $T_L/T_C \approx 0,6$ se mantuvo estable, confirmando la coherencia física del desfase hidrológico. Se concluye que la calibración local de ecuaciones empíricas mejora significativamente la representación del comportamiento hidrológico en cuencas altoandinas, aportando bases metodológicas para el desarrollo de relaciones T_C -geomorfología ajustadas a condiciones regionales.

Palabras clave: tiempo de concentración; tiempo de desfase; métodos empíricos; cuencas altoandinas; calibración hidrológica.

ABSTRACT

The time of concentration (T_c) is a key hydrological parameter for peak-flow estimation and hydraulic design, whose accuracy depends on local physiographic and climatic conditions. This study evaluates the applicability of five empirical methods (Kirpich, Giandotti, Témez, SCS and Passini) in the Kaynacas high-Andean basin (Bolivia), comparing their results with T_c and lag time (T_L) values derived from hydrographs constructed with observed rainfall and discharge data. Effective rainfall was estimated using the phi-index method and initial loss analysis. Results indicate a moderate variability among methods, with an average empirical T_c of 2.76 h and an observed T_c of 3.66 h, approximately 30% higher. Equations that integrate both surface and channel flow components (Giandotti and Témez) provided the best agreement with observed values, whereas Kirpich and Passini tended to underestimate T_c . The $T_L/T_c \approx 0.6$ ratio remained consistent, confirming the physical coherence of hydrological lag. It is concluded that local calibration of empirical equations significantly improves the hydrological representation of high-Andean catchments, providing a methodological basis for developing regionally adjusted T_c -geomorphology relationships.

Key words: time of concentration; lag time; empirical methods; high-Andean catchments; hydrological calibration

INTRODUCCION

El tiempo de concentración (TC) es un parámetro hidrológico fundamental para describir la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación, ya que representa el tiempo requerido para que el flujo superficial generado en el punto más distante alcance la salida de la cuenca (Gericke & Smithers, 2014). Su estimación constituye un componente esencial en la modelación hidrológica, simulación de escorrentía y diseño hidráulico, aunque continúa siendo una de las variables con mayor incertidumbre debido a la diversidad de criterios y métodos existentes para su cálculo (Beven, 2020; Michailidi et al., 2018).

La estimación del TC se realiza frecuentemente mediante ecuaciones empíricas, debido a su simplicidad operativa y a la disponibilidad de los parámetros geomorfológicos necesarios como área de cuenca, longitud del cauce principal y pendiente media (McCuen, 2009), sin embargo; diversos estudios han demostrado discrepancias significativas entre los resultados obtenidos con diferentes métodos empíricos, generando incertidumbre en la estimación de caudales pico y escorrentía superficial (Alamri et al., 2023; Sultan et al., 2022). Estas discrepancias se atribuyen principalmente a que gran parte de las ecuaciones fueron desarrolladas para condiciones hidrológicas específicas, generalmente en regiones de Estados Unidos y Europa, lo cual limita su transferencia directa a otras regiones sin un proceso de validación (Gericke & Smithers, 2014; Nam et al., 2024).

En regiones de montaña, como los Andes bolivianos, la complejidad hidrológica se incrementa debido a la presencia de fuertes gradientes altitudinales, escorrentía rápida, suelos poco desarrollados y precipitaciones de carácter estacional que favorecen la generación de crecidas súbitas (Mejía-Veintimilla et al., 2019).

En estos entornos, Sultan et al. (2022) destacan la necesidad de complementar las estimaciones

empíricas del TC con valores derivados del análisis de hidrogramas construidos a partir de datos observados de precipitación y caudal, con el fin de evaluar la coherencia hidrológica de los métodos aplicados.

En Bolivia, la disponibilidad de investigaciones hidrológicas en cuencas de alta montaña es limitada. Tal es el caso de la cuenca Kaynacas, ubicada en el departamento de Chuquisaca, la cual posee relevancia estratégica por su aporte al abastecimiento de agua en áreas rurales y urbanas de la ciudad de Sucre (Echeverría, 2024). No obstante, no se cuenta con estudios comparativos que permitan establecer estimaciones confiables del TC bajo condiciones hidrológicas locales.

En este contexto, el objetivo de este estudio es estimar el tiempo de concentración de la cuenca Kaynacas a partir de hidrogramas construidos con datos observados de precipitación y caudal, y compararlo con estimaciones obtenidas mediante seis métodos empíricos ampliamente utilizados en hidrología: Kirpich (1940), Giandotti (1934), Témez (1987), SCS (1972), Passini (1971) y Ventura (1993), con el fin de evaluar su aplicabilidad bajo condiciones fisiográficas andinas.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica Kaynacas se localiza en la región andina del sur de Bolivia y se extiende entre los departamentos de Potosí y Chuquisaca, aproximadamente a 30 km al norte de la ciudad de Sucre.

La cuenca Kaynacas tiene una superficie de 82,82 km² y se distribuye administrativamente entre los municipios de Ravelo, Poroma y Sucre, integrando comunidades rurales como Cajamarca, Mamahuasi y Kaynacas (Echeverría, 2024). Presenta relevancia estratégica debido a la represa Kaynacas, destinada al riego agrícola, y al sistema de aducción Cajamarca-ELAPAS, que aporta al abastecimiento de agua potable para Sucre.

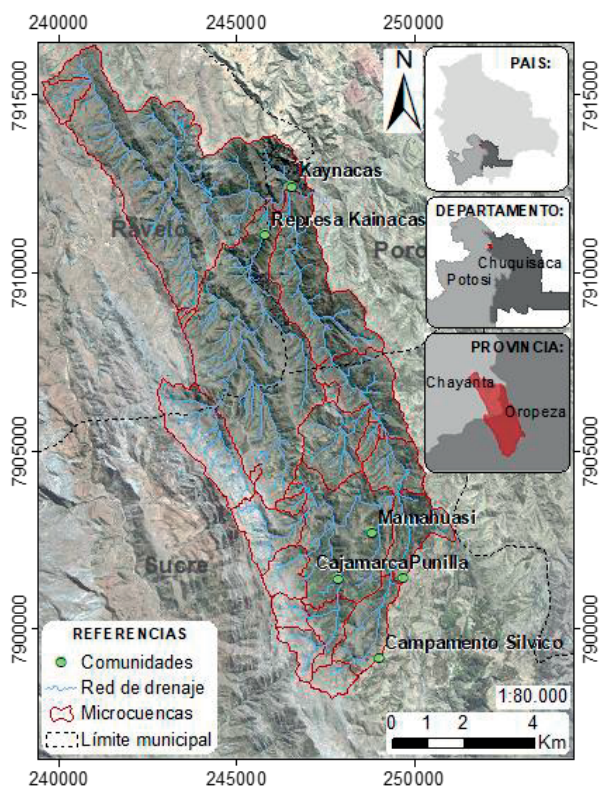


Figura 1. Área de estudio

Fisiográficamente, es una cuenca de alta montaña andina, con altitudes entre 2700 y 3853 m s.n.m., relieve escarpado y escorrentía superficial rápida. Su régimen hídrico es estacional pluvial, con lluvias concentradas entre noviembre y marzo, características que condicionan una respuesta hidrológica rápida y eventos de crecida súbita en época de lluvias (Echeverría, 2024).

METODOLOGÍA

Monitoreo de precipitación y caudal

La metodología del estudio se basa en un enfoque cuantitativo comparativo, orientado a estimar el tiempo de concentración (T_C) de la cuenca de alta montaña Kaynacas (Bolivia) con la construcción de hidrogramas a partir de datos observados y mediante la aplicación de métodos empíricos ampliamente utilizados en hidrología superficial. Este enfoque sigue la estructura metodológica aplicada por Sultan et al. (2022) en su estudio comparativo de métodos empíricos de T_C y tiempo de rezago

(T_L) en cuencas tropicales de Etiopía, donde se evaluó el desempeño de diferentes ecuaciones hidrológicas utilizando parámetros derivados de la morfometría de cuencas.

En la cuenca Kaynacas se implementó un sistema automatizado de monitoreo hidrometeorológico para registrar las variaciones de precipitación y caudal superficial durante los eventos de lluvia. El sistema incluyó un pluviómetro automático Hobo RG3-M, con resolución de 0,2 mm y registros cada 5 minutos, y una estación meteorológica Davis configurada para medir temperatura, humedad, presión, radiación solar, y viento, con una frecuencia de 30 minutos.

Para el control hidrométrico se instalaron sensores automáticos de nivel Hobo, programados para registrar datos cada 10 minutos. Los niveles se convirtieron a caudales mediante aforos mensuales realizados y curvas de gasto actualizadas. Los eventos de lluvia y escorrentía se definieron con un intervalo mínimo de 30 minutos sin precipitación, considerando únicamente hidrogramas con un solo pico y recesión bien definida.

Hidrogramas, cálculo de T_C y T_L con datos observados

La correspondencia temporal entre las series de precipitación y caudal permitió identificar los eventos lluvia - escorrentía, a partir de los cuales se estimó el T_C , correspondiente al intervalo entre el centroide de la lluvia efectiva y el punto de inflexión de la curva de recesión. El centroide de la lluvia efectiva (t_{wc}) se calculó mediante la ecuación:

$$t_{wc} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times t_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Donde: W_i representa la lluvia efectiva durante el intervalo i , t_i el tiempo transcurrido y n el número total de registros en cada evento. La lluvia efectiva se obtuvo con el método del SCS.

La precipitación efectiva se calculó a partir de la pérdida inicial y de la función de tasa de pérdida basada en el método del índice ϕ (phi-index method) (Simas y Hawkins, 1996; Dingman,

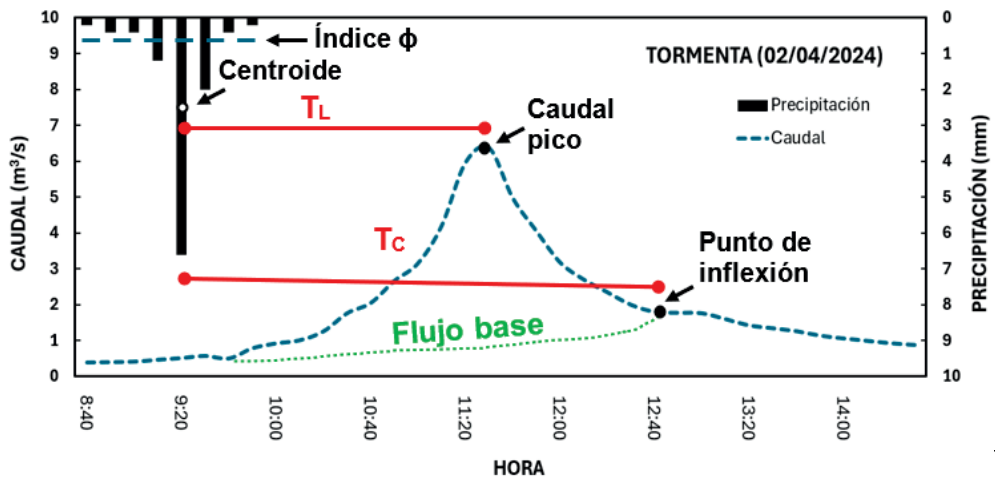
2002). El T_C y T_L se calcularon para cada evento de escorrentía individual, y sus medianas se utilizaron como medidas representativas del comportamiento hidrológico de la cuenca, minimizando el efecto de valores extremos (Figura 2).

Métodos empíricos para la estimación del T_C

En coherencia con estudios que indican que el T_C depende de la forma y tamaño de la cuenca,

la pendiente, la longitud del cauce y las características de escorrentía (Gericke & Smithers, 2014; Michailidi et al., 2018), en este estudio se aplicaron cinco ecuaciones (Tabla 1) empíricas de uso frecuente en América Latina seleccionadas por su pertinencia en cuencas rurales y de topografía montañosa y por su utilidad cuando no se dispone de series de datos extensas o calibradas, permitiendo analizar la sensibilidad del T_C ante variaciones geomorfológicas y comparar resultados entre métodos (Sultan et al., 2022).

Figura 2. Esquema para describir el hietograma y su respuesta (hidrograma) y las definiciones de tiempo de retardo (T_L) y tiempo de concentración (T_C) y otros



Tal	Método		
	Kirpich	$T_C = 0.06628 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	L= longitud del cauce principal (m) S= pendiente del cauce principal (m/m)
	Giandotti	$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$	A= área de la cuenca (km²) L= longitud del cauce principal (km) H= desnivel máximo en la cuenca (m)
	Témez	$T_C = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	L= longitud del cauce principal (m) S= pendiente media de la cuenca (m/m)
	SCS	$T_C = 0.00203L^{0.8} \left[\frac{\left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{(S)^{0.5}} \right]$	L= longitud del cauce principal (km) CN= Número de Curva SCS S= pendiente media de la cuenca (m/m)
	Passini	$T_C = \frac{[0.108 \cdot (A \cdot L)^{1/3}]}{S^{0.5}}$	A= área de la cuenca (km²) L= longitud del cauce principal (km) H= desnivel máximo en la cuenca (m) S= pendiente media de la cuenca (m/m)

Nota. El T_C para los métodos de Kirpich, Giandotti, Témez, y Passini se obtiene en horas, para el método del SCS el resultado se obtiene en minutos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores del tiempo de concentración (T_C) y del tiempo de retardo (T_L) obtenidos mediante los métodos empíricos (Kirpich, Giandotti, Témez, SCS y Passini) mostraron una dispersión moderada, con un T_C medio de 2,76 h y un T_L medio de 1,66 h (Tabla 2). Esta variabilidad es consistente con lo reportado por Fentaw et al. (2022) y Sultan et al. (2022) en cuencas montañosas y tropicales, donde las discrepancias entre métodos pueden alcanzar $\pm 40\%$ debido a las diferencias en formulación y condiciones hidrológicas. En ambos estudios, los métodos basados solo en flujo superficial (Kirpich y Passini) tienden a subestimar el T_C , mientras que los que integran variables geomorfológicas (Giandotti y Témez) ofrecen valores más realistas.

En la cuenca Kaynacas, los valores observados de T_C derivados de eventos medidos (Tabla 3, Figura 3) presentan una media de 3,66 h, aproximadamente 30 % superior al promedio empírico, lo que indica que las ecuaciones tradicionales subrepresentan el tiempo real de respuesta hidrológica. Este comportamiento coincide con lo reportado por Nam et al. (2024) y Alamri et al. (2023), quienes atribuyen las diferencias a la influencia de la rugosidad superficial, la infiltración variable y los fuertes gradientes topográficos característicos de ambientes montañosos.

La relación promedio $T_L \approx 0,61 \cdot T_C$ observada es congruente con la proporción $T_L/T_C \approx 0,6$ documentada por Sultan et al. (2022), lo que demuestra una coherencia hidrológica entre cuencas tropicales y altoandinas y refuerza el uso del T_L como parámetro de verificación de consistencia. La mayor duración del T_C observado puede atribuirse a la alta infiltración inicial, la cobertura vegetal densa y la presencia de almacenamientos temporales, factores que retardan la escorrentía y amortiguan las crecidas. Este patrón coincide con los planteamientos de Beven (2020) y Michailidi et al. (2018), quienes sostienen que el T_C es una variable hidráulica dependiente de la intensidad

de lluvia y la humedad antecedente, más que una constante geométrica.

En conjunto, los resultados indican que la cuenca Kaynacas presenta una respuesta semi-rápida, con un T_C medio inferior a 4 h, típico de sistemas de montaña con cauces definidos.

No obstante, los métodos empíricos tienden a subestimar el T_C real, lo que puede generar sobreestimaciones de caudales pico si se aplican sin ajuste. Por ello, se recomienda la calibración local de ecuaciones como las de Kirpich y Témez, siguiendo el enfoque regional propuesto por Sultan et al. (2022) y Alamri et al. (2023), con el fin de desarrollar relaciones representativas para condiciones andinas.

Tabla 2. Resultados de T_C y T_L obtenidos por métodos empíricos seleccionados

Método	T_C (h)	T_L (h)
Kirpich	2,31	1,39
Giandotti	2,56	1,54
Témez	3,55	2,13
SCS	3,35	2,01
Pasisni	2,03	1,22
Media	2,76	1,66
Mediana	2,56	1,54

Tabla 3. Resultados de T_C y T_L con datos observados de eventos

Fecha Evento	T_C (h)	T_L (h)
29/12/2023	4,00	2,67
30/12/2023	4,80	2,67
27/1/2024	2,67	1,17
8/2/2024	3,67	2,67
13/2/2024	4,00	2,83
7/3/2024	3,17	2,00
2/2/2024	3,33	2,17
Media	3,66	2,31
Mediana	3,67	2,67

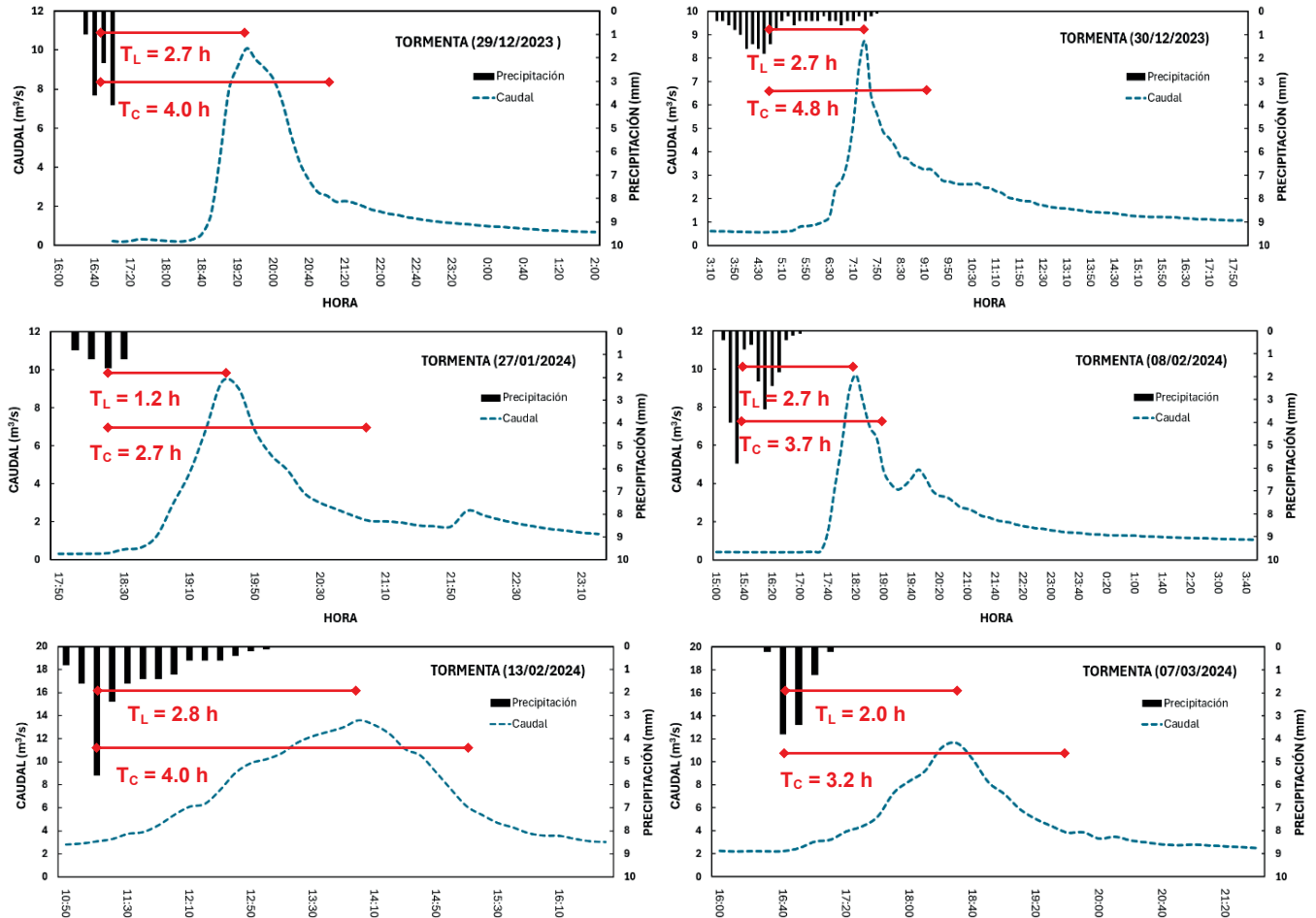


Figura 3. Eventos de precipitación – escorrentía para el año hidrológico 2023 – 2024, en los cuales se indica el tiempo de retardo (T_L) y el tiempo de concentración (T_C) para la cuenca

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la cuenca de alta montaña Kaynacas demuestran que la estimación del tiempo de concentración (T_c) mediante métodos empíricos presenta una variabilidad moderada entre ecuaciones, con valores promedio inferiores a los observados en campo. Esta diferencia confirma que las fórmulas empíricas desarrolladas para regiones templadas o de baja pendiente no reproducen adecuadamente las condiciones hidrológicas de las cuencas altoandinas, caracterizadas por gradientes topográficos pronunciadas, suelos de alta infiltración inicial y cobertura vegetal heterogénea.

El T_c medio observado de 3,66 h resultó aproximadamente 30 % superior al valor promedio obtenido con los métodos empíricos (2,76 h), lo que sugiere una subestimación sistemática del tiempo real de respuesta hidrológica. Esta tendencia coincide con lo reportado por Sultan et al. (2022) en cuencas tropicales de Etiopía y por Alamri et al. (2023) en ambientes áridos, evidenciando que la validez de las ecuaciones empíricas depende fuertemente de la región hidrológica y las condiciones climáticas locales.

La relación $T_L/T_c \approx 0,6$, observada tanto en los resultados de Kaynacas como en los estudios comparativos de Sultan et al. (2022), confirma la consistencia física del desfase entre la lluvia

efectiva y la escorrentía directa, consolidándose como un parámetro de validación útil para la modelación hidrológica en cuencas montañosas. Asimismo, los métodos que combinan componentes de flujo superficial y de canal (Giandotti y Témez) mostraron una mayor coherencia con los valores observados, mientras que las fórmulas basadas exclusivamente en flujo superficial (Kirpich y Passini) tendieron a subestimar el Tc.

En términos aplicados, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de ajustar regionalmente los coeficientes de las ecuaciones empíricas utilizadas, especialmente las de Kirpich y Témez, siguiendo el enfoque de calibración local propuesto por Sultan et al. (2022). Este ajuste permitiría mejorar la precisión de los cálculos de Tc y, por consiguiente, reducir la incertidumbre en la estimación de caudales pico y en el dimensionamiento de obras hidráulicas en regiones andinas.

Este estudio contribuye a la comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas altoandinas bolivianas y proporciona una base metodológica para el desarrollo de relaciones Tc–geomorfología calibradas localmente, que favorezcan la transferencia de conocimiento hacia otros sistemas de montaña con condiciones fisiográficas similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alamri, N., Afolabi, K., Ewea, H., & Elfeki, A. (2023). Evaluation of the time of concentration models for enhanced peak flood estimation in arid regions. *Sustainability*, 15(3), 1987. <https://doi.org/10.3390/su15031987>
- Beven, K. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 2655–2670. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2655-2020>
- Costabile, P., Barbero, G., Nagy, E., Négyesi, K., Petaccia, G., & Costanzo, C. (2024). Predictive capabilities, robustness and limitations of two event-based approaches for lag time estimation in heterogeneous watersheds. *Journal of Hydrology*, 642, 131814. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131814>
- Dingman, S. L. (2002). *Physical Hydrology* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Echeverría Tapia, J. C. (2024). *Modelación hidrológica de la cuenca de alta montaña Kaynacas bajo escenarios de cambio climático* [Trabajo de grado, Universidad del Valle].
- Fentaw, M., Meshesha, D. T., Tsunekawa, A., Sultan, D., & Tsubo, M. (2022). Analysis of watershed response to rainfall variability using observed data in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrology Research*, 53(5), 619–636. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.020>
- Gericke, O. J., & Smithers, J. C. (2014). Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 1935–1971. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712>
- Giandotti, M. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Annali dei Lavori Pubblici*, 72, 449–479.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- McCuen, R. H. (2009). Uncertainty analyses of watershed time parameters. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5), 490–498. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000020](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000020)
- Mejía-Veintimilla, D., Ochoa-Cueva, P., Samaniego-Rojas, N., Félix, R., Arteaga, J., Crespo, P., & Fries, A. (2019). River discharge simulation in the high Andes of Southern Ecuador using high-resolution radar observations and meteorological station data. *Remote Sensing*, 11(23), 2804. <https://doi.org/10.3390/rs11232804>
- Michailidi, E. M., Antoniadis, S., Koukouvinos, A., Bacchi, B., & Efstratiadis, A. (2018). Timing the time of concentration: Shedding light on a paradox. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 721–740. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1450985>
- Nam, S., Lim, H., Choi, B., Li, Q., Moon, H., & Choi, H. T. (2024). Characteristics and estimation of the time of concentration for small forested catchments in steep mountainous terrain. *Forests*, 15(1), 186. <https://doi.org/10.3390/f15010186>
- Passini, F. (1971). *Manuale di Idrologia Tecnica*. Edizioni Cremonese.
- Simas, M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- Soil Conservation Service (SCS). (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. U.S. Department of Agriculture.
- Sultan, D., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D. T., Fenta, A. A., & Ebabu, K. (2022). Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101025. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101025>
- Témez, J. R. (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. CEDEX – Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.