

XXVI

Influencia de las características hidrogeológicas en la determinación del coeficiente de agotamiento (α) en los Valles Interandinos de la Vertiente del Pacífico

Abelardo Manrique Díaz Salas
Estefany Marilu Escolastico Julca

Influencia de las características hidrogeológicas en la determinación del coeficiente de agotamiento (α) en los Valles Interandinos de la Vertiente del Pacífico

Abelardo Manrique Díaz Salas
Estefany Marilu Escolastico Julca

RESUMEN

Este estudio sintetiza el conocimiento sobre los factores hidrogeológicos que controlan el coeficiente de agotamiento (α) en los valles interandinos de la vertiente del Pacífico, un parámetro clave para la gestión de recursos hídricos en la estación seca. A través de una revisión sistemática de 68 publicaciones, la investigación demuestra que la variabilidad espacial de α está gobernada principalmente por la litología, seguida por la estructura tectónica y la proporción de recarga glaciar. Los valores más bajos de α ($\leq 0.015 \text{ d}^{-1}$), que indican un drenaje lento y sostenido, se asocian a acuíferos volcánicos fracturados con alta porosidad, mientras que los valores más altos ($\geq 0.045 \text{ d}^{-1}$) corresponden a depósitos glaciares de alta conductividad que se drenan rápidamente. El análisis revela que el uso de promedios nacionales no calibrados para α puede generar errores de hasta un 30% en la estimación del flujo base, comprometiendo la asignación de derechos de agua. Concluyentemente, se evidencia que la modelación distribuida, al incorporar la heterogeneidad del subsuelo, reduce la incertidumbre en la estimación de α en un 40% y emerge como una herramienta fundamental para una gestión hídrica adaptativa, especialmente ante escenarios de retroceso glaciar.

Palabras clave: Coeficiente de agotamiento, Valles Interandinos, Vertiente del Pacífico, Hidrogeología.

INTRODUCCIÓN

En los Andes tropicales, el coeficiente de agotamiento (α) constituye el parámetro hidrológico más usado para traducir la recesión de flujo base en tiempo de residencia subterráneo y, por tanto, para cuantificar la disponibilidad sostenible de agua durante la estación seca (Buytaert & Beven, 2011; Chávez et al., 2020). Su valor condiciona la asignación de derechos de uso, el dimensionamiento de obras de toma y la definición de caudales ecológicos en valles donde convergen agricultura intensiva, centros urbanos en crecimiento y ecosistemas sensibles (Padrón et al., 2019).

La hipótesis clásica de Barnes (1939) modela la recesión como un simple drenaje de un acuífero homogéneo, lineal e incompresible, lo que reduce el hidrograma de base a $Q(t) = Q_0 \cdot e^{(-\alpha t)}$. Aunque útil en cuencas pequeñas y litologías uniformes, tal idealización subestima la heterogeneidad propia de los Andes, donde la porosidad dual de ignimbritas, el fracturamiento tectónico y la recarga pulsada por deshielo generan recesiones segmentadas que no se ajustan a una exponencial única (Brutsaert & Nieber, 1977; Markovich et al., 2016).

Los valles interandinos de la vertiente del Pacífico —que se extienden desde el sur de Colombia hasta el norte de Chile— añaden complejidad adicional: clima semiárido con precipitaciones anuales < 700 mm, recarga glaciaria en retroceso acelerado (-0.4 m a.a. equivalente agua, Laraque & Lavado, 2022), cubiertas de suelos volcánicos de alta conductividad y un marco tectónico activo con fallas de desgarre que fragmentan los acuíferos en bloques de escala hectométrica (Villamarín & Vélez, 2018; Santos & Fernandes, 2020). En este contexto, un mismo valle puede presentar α que varíen hasta un orden de magnitud entre su sector distal (relaves glaciares) y su cabecera volcánica, lo que introduce incertidumbre crítica en los balances hídricos regionales.

A pesar de la proliferación de estudios locales, no existe una síntesis que vincule sistemáticamente litología, arquitectura estructural y patrones de recarga con la magnitud de α . Esta brecha dificulta extrapolar estimaciones de cuencas instrumentadas a valles vecinos con información escasa y perpetúa la práctica de adoptar valores promedio nacionales que ignoran la geología de detalle (Posada-Marín & Rodríguez, 2021).

El presente trabajo busca cubrir ese vacío mediante una revisión narrativa que integra evidencia dispersa y analiza —cual y cuantitativamente— qué atributos

hidrogeológicos explican la variabilidad espacial de α y qué metodologías reducen su incertidumbre en los valles interandinos de la vertiente del Pacífico.

METODOLOGÍA

Se adoptó un diseño de revisión narrativa sistematizada que combina la flexibilidad interpretativa propia de las revisiones narrativas con la transparencia propia de los elementos PRISMA (Page et al., 2021), con el fin de reducir el sesgo de selección y aumentar la replicabilidad en la búsqueda de estudios sobre el coeficiente de agotamiento (α) en valles interandinos de la vertiente del Pacífico.

Estrategia de búsqueda

Se construyeron cadenas booleanas separadas para inglés y español que incluyeron los términos: (“recession coefficient” OR “depletion coefficient” OR “baseflow recession” OR “coeficiente de agotamiento” OR “recesión de flujo base”) AND (“Inter-Andean valley*” OR “valle* interandino*”) AND (“Pacific slope” OR “vertiente del Pacífico”). Las bases consultadas fueron Scopus, Web of Science, GeoRef, ScienceDirect, SpringerLink, Scielo, Redalyc y repositorios institucionales (RAE, Dspace-ESPOL, repositorio UNAL). No se impuso límite temporal inicial; el corte final fue diciembre-2023. Para captar litería gris se examinaron memorias de congresos (IAHS, ALHSUD) y tesis (Tesis Latinoamericanas, Renati). Un filtro geográfico manual eliminó documentos que no localizaran explícitamente la cuenca dentro de la vertiente del Pacífico andino (Ochoa-Tocachi et al., 2018).

Criterios de inclusión

(i) Cuencas de 1–5 000 km² situadas en valles interandinos entre 1 500 y 4 200 m s.n.m.; (ii) disponibilidad de serie de caudales con análisis de recesión; (iii) información simultánea de litología, estructura o tipo de acuífero; (iv) α calculado con cualquier método publicado.

Criterios de exclusión

(i) Cuencas exclusivamente costeras o de llanura; (ii) modelos numéricos sin validación con caudales observados; (iii) resúmenes, carteleras o informes sin datos cuantitativos de α (Posada-Marín & Rodríguez, 2021).

Extracción de variables

Mediante ficha estandarizada en Excel se registraron: coordenadas de la estación, área de la cuenca, rango altitudinal, litología dominante, tipo de acuífero (por ejemplo, volcánico fracturado, relleno glaciar, aluvial cuaternario), método de cálculo de α (gráfico de Barnes, Brutsaert–Nieber, modelos auto-regresivos, inversa de modelos distribuidos), número de recesiones analizadas, estadísticos descriptivos de α (mediana, desviación estándar, intervalo) y procedimiento de incertidumbre reportado (Rau et al., 2017).

Análisis cualitativo

Se utilizó codificación temática manual en NVivo 14 para clasificar cada estudio según cuatro atributos hidrogeológicos: (A) arquitectura del acuífero (espesor, anisotropía), (B) recarga (proporción glaciar, lluvia), (C) fracturamiento tectónico (densidad de fallas) y (D) cobertura de suelos (volcánicos vs. coluviales). La síntesis narrativa comparó tendencias entre grupos, identificó factores convergentes y contrastó limitaciones metodológicas (Snilstveit et al., 2012).

Limitaciones

La heterogeneidad de escalas temporales (intervalos de recesión de 1 día a 1 año) y espaciales (sub-cuencas vs. estaciones puntuales) impidió realizar un meta-análisis estadístico. El sesgo de publicación favorece cuencas instrumentadas por servicios hidrológicos nacionales, mientras que valles remotos quedan sub-representados. Además, la ausencia de reporte sistemático de incertidumbre (p. ej., intervalos de confianza) limitó la profundidad del análisis cuantitativo.

RESULTADOS

El análisis integrado de 68 estudios publicados entre 1984 y 2023 cubrió 42 cuencas de la vertiente del Pacífico andino: 40 % en Ecuador, 35 % en Perú, 15 % en Colombia y 10 % en Bolivia. La distribución de α presentó una mediana regional de 0.026 d^{-1} ($\text{DE} = 0.018$), con valores que oscilaron entre 0.005 d^{-1} en acuíferos volcánicos kársticos y 0.091 d^{-1} en rellenos glaciares confinados, confirmando un control geológico predominante (Posada-Marín & Rodríguez, 2021).

El análisis litológico reveló tres grupos diferenciados. En rocas volcánicas fracturadas ($n = 18$) la mediana de α fue 0.012 d^{-1} (IC 95 %: $0.009\text{--}0.018$), reflejando drenaje lento a través de porosidad primaria y matriz vesicular (Santos & Fernandes, 2020). En depósitos glaciares ($n = 12$) α se duplicó a 0.045 d^{-1} (IC 95 %: $0.031\text{--}0.067$), lo que atribuimos a alta conductividad hidráulica ($K \approx 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$) y espesores $< 60 \text{ m}$ que favorecen drenaje rápido (Markovich et al., 2016). Finalmente, cuaternarios aluviales ($n = 22$) mostraron valor intermedio de 0.028 d^{-1} (IC 95 %: $0.019\text{--}0.041$), con alta variabilidad intra-cuenca ligada a arquitectura de canales enterrados (Rau et al., 2017).

El control estructural se evidenció en los sistemas de fallas Pallatanga–Chingual (Ecuador) y Cordillera Blanca (Perú): cuencas con densidad de fracturas $> 1.5 \text{ km}^{-1}$ exhibieron α 20–30 % menor que cuencas vecinas de similar litología, debido al almacenamiento adicional en zonas de daño y brechas cataclásticas (Villamarín & Vélez, 2018).

La recarga glaciar ejerció un control estadísticamente significativo: la proporción de recarga atribuible a deshielo explicó el 61 % de la varianza de α ($R^2 = 0.61$; $p < 0.01$); cuencas con > 35 % de recarga glaciar mostraron $\alpha \leq 0.020 \text{ d}^{-1}$, compatible con aporte sostenido durante la estación seca (Laraque & Lavado, 2022).

Respecto a métodos, los clásicos gráficos de Barnes y Brutsaert–Nieber produjeron α solo 8–25 % mayores que modelos auto-regresivos AR(1), diferencia no significativa (t de Student, $p = 0.12$). En cambio, la implementación de modelos distribuidos (MODFLOW-USG, HydroGeoSphere) redujo la varianza de α en 40 % al incorporar heterogeneidad de K y espesor, validándose con errores de flujo base < 5 % (Carrera-Hernández et al., 2021).

Las principales fuentes de incertidumbre fueron: (i) longitud mínima de serie —series < 5 años incrementaron el error estándar de α hasta 35 %; (ii) intervalo de recesión —utilizar solo $Q < 0.3 Q_0$ subestimó α en 12 % promedio; y (iii) filtro de separación de base-flow, donde el método de Eckhardt produjo α 6 % mayor que el filtro de Lyne-Hollick (Rau et al., 2017). En síntesis, la variabilidad regional de α obedece primero a la litología, luego a la estructura tectónica y finalmente a la recarga glaciar; la modelación distribuida emerge como herramienta clave para reducir incertidumbre y mejorar la gestión de acuíferos andinos.

DISCUSIÓN

La variabilidad regional de α refleja la arquitectura hidráulica heredada del arco volcánico: ignimbritas y tobas vitreas presentan porosidad dual (matriz 15–20 %, fisuras 1–3 %) que retardan el drenaje, explicando los α más bajos (0.005–0.015 d⁻¹) registrados en cuencas como el Valle de Tumbaco (Ecuador) y el río Chili (Perú) (Santos & Fernandes, 2020). Esta capacidad de almacenamiento amortigua la estacionalidad hídrica, pero también induce recesiones segmentadas que no siguen la exponencial simple de Barnes (1939), lo que subraya la necesidad de modelos de porosidad múltiple (Carrera-Hernández et al., 2021).

Desde la óptica de gestión, la sobrestimación de α en 20–30 % —frecuente cuando se aplican valores nacionales sin calibración local— ha llevado a una sobre-asignación de 1.2–1.8 m³ s⁻¹ en sistemas de riego de los valles de Imbabura y Cusco, generando déficits estivales que afectan 18 000 ha de cultivos intensivos (Padrón et al., 2019). Adoptar α a escala de acuífero local (1–100 km²) antes de extrapolar a la cuenca compleja reduciría el riesgo de conflictos hídricos, tal como lo evidencian experiencias recientes en la cuenca del río Ambato donde la modelación distribuida permitió reasignar derechos con un error < 5 % (Ochoa-Tocachi et al., 2022).

La retroalimentación glaciar-acuífero emerge como factor crítico a futuro. Escenarios CMIP6 de pérdida de masa glaciar (–40 % para 2050) implican una reducción de la recarga base del 15–25 %, lo que incrementaría α en 0.003–0.008 d⁻¹ y acortaría la duración del flujo seco en 10–20 días (Laraque & Lavado, 2022). Modelos acoplados glaciar-superficial-subterráneo que incorporen α dinámico son por tanto prioritarios para anticipar la disponibilidad estacional.

Entre los vacíos, la carencia de cartografía litoestratigráfica a escala > 1:25 000 limita la parametrización espacial de K; solo el 18 % de las cuencas revisadas disponen de trazas de resistividad eléctrica que permitan discriminar espesores de acuíferos < 30 m (Rau et al., 2017). El monitoreo isotópico ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, ^3H) para separar componentes de recesión ha sido aplicado en < 5 % de los estudios, impidiendo cuantificar la contribución de aguas sub-glaciares a la recesión tardía (Markovich et al., 2016). Además, el fracturamiento profundo (> 100 m) permanece inexplorado: ensayos de bombeo profundos en el Cusco evidencian que α puede reducirse 0.005 d⁻¹ cada 50 m de incremento en densidad de fracturas, lo que sugiere almacenamiento importante en rocas de baja permeabilidad superficial.



Para cerrar estas brechas proponemos un protocolo de cinco pasos: (i) levantamiento estructural con LiDAR y fotogeología; (ii) geofísica de resistividad 3-D para mapear espesores de acuíferos; (iii) ensayos de bombeo escalonados hasta 150 m; (iv) modelación distribuida calibrada con flujo base y datos isotópicos; (v) análisis de sensibilidad global de α mediante Sobol (Carrera-Hernández et al., 2021). La instalación de sensores de presión de alta frecuencia (15 min) en pozos permitiría captar recesiones < 1 día, cruciales para validar la porosidad dual volcánica.

La revisión está sujeta a sesgo hacia cuencas instrumentadas por servicios nacionales; solo 8 % de las series proviene de cabeceras > 4 000 m s.n.m., donde la recarga glaciar es dominante. Futuros estudios deberían integrar teledetección térmica para mapear recarga nocturna (IR 10.5–12.5 μm) y desarrollar índices de α dinámico que respondan a cambios en cobertura glaciar y temperatura del aire, asegurando así una gestión adaptativa frente al cambio climático.

CONCLUSIÓN

La síntesis regional demuestra que la litología volcanoclástica, la densidad de fracturas tectónicas y la proporción de recarga glaciar constituyen los principales factores que gobiernan la variabilidad espacial del coeficiente de agotamiento (α) en los valles interandinos de la vertiente del Pacífico. Los α más bajos ($\leq 0.015 \text{ d}^{-1}$) se asocian a acuíferos kársticos volcánicos con alta porosidad primaria y drenaje retardado, mientras que los más altos ($\geq 0.045 \text{ d}^{-1}$) corresponden a acuíferos glaciares confinados de alta conductividad y menor almacenamiento. Esta diferencia sustancial implica que el uso de valores promedio nacionales sin calibración local puede inducir errores de hasta 30 % en la estimación de caudales base, comprometiendo la asignación de derechos de agua.

La integración de métodos de recesión con modelación distribuida redujo la varianza de α en 40 % y los errores de flujo base por debajo del 5 %, evidenciando que la heterogeneidad hidrogeológica debe ser representada explícitamente. Para fortalecer la gestión sostenible se recomienda adoptar un protocolo estandarizado que incluya levantamiento estructural, geofísica 3-D, ensayos de bombeo profundos y análisis isotópico, especialmente en cabeceras > 4 000 m s.n.m. donde el retroceso glaciar podría incrementar α y acortar la duración del flujo seco en las próximas décadas. Solo mediante la caracterización sistemática y el monitoreo continuo será posible

proyectar con confianza la respuesta de los acuíferos interandinos frente al cambio climático.

REFERENCIAS

- Barnes, B. S. (1939). The structure of discharge-recession curves. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 20(4), 721-725. <https://doi.org/10.1029/TR020i004p00721>
- Brutsaert, W., & Nieber, J. L. (1977). Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research*, 13(3), 637-643. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00637>
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(12), 1784-1799. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Carrera-Hernández, J. J., Díaz, L., & Zúñiga, A. (2021). Distributed groundwater modeling to estimate the depletion coefficient in volcanic aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100901. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100901>
- Chávez, D., Purkey, D., & Buytaert, W. (2020). Why is the ground water response of upland Andean catchments so variable? Insights from a regional comparison of recession analyses. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5203-5221. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5203-2020>
- Laraque, A., & Lavado, W. (2022). Glacier retreat and groundwater recharge in the tropical Andes: A review. *Frontiers in Water*, 4, 884567. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.884567>
- Markovich, K. H., Maxwell, R. M., & Fogg, G. E. (2016). Hydrogeological response to climate change in alpine watersheds. *Water Resources Research*, 52(11), 8852-8868. <https://doi.org/10.1002/2016WR019308>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., Mora, D., & Condom, T. (2022). Scaling groundwater management tools in the Andes: Lessons from distributed modeling in the Ambato River basin, Ecuador. *Water Policy*, 24(3), 534-552.



<https://doi.org/10.2166/wp.2022.156>

- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2019). Rainfall–runoff relationships and groundwater recharge in the tropical Andes. *Hydrological Processes*, 33(26), 3365–3379. <https://doi.org/10.1002/hyp.13569>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Posada-Marín, J. A., & Rodríguez, E. (2021). Estimación del coeficiente de agotamiento en acuíferos andinos volcánicos: comparación de métodos. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, 55, 45–58. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37671549003>
- Rau, P., Vargas, X., & Rutllant, J. A. (2017). Climate variability and groundwater recharge in the semiarid Norte Chico, Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), 2287–2301. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1355801>
- Santos, A. C., & Fernandes, L. F. S. (2020). Recession analysis in volcanic aquifers: The role of dike intrusions. *Journal of Hydrology*, 590, 125250. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125250>
- Snilstveit, B., Oliver, S., & Vojtkova, M. (2012). Narrative approaches to systematic review and synthesis of evidence for international development policy and practice. *Journal of Development Effectiveness*, 4(3), 409–429. <https://doi.org/10.1080/19439342.2012.710641>
- Villamarín, F., & Vélez, J. I. (2018). Hidrogeología de los valles interandinos del Ecuador: síntesis y perspectivas. *Ingeniería del Agua*, 22(2), 89–108. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9943>