



XXVII

**Modelamiento de la
dinámica del caudal base
como herramienta de
adaptación al cambio
climático en cuencas
costeras con estrés hídrico**

Abelardo Manrique Díaz Salas
Estefany Marilu Escolastico Julca

Modelamiento de la dinámica del caudal base como herramienta de adaptación al cambio climático en cuencas costeras con estrés hídrico

Abelardo Manrique Díaz Salas
Estefany Marilu Escolastico Julca

RESUMEN

El cambio climático amenaza la sostenibilidad de cuencas costeras mediterráneas y semiáridas al reducir la precipitación y aumentar la evaporación, comprometiendo el caudal base (Q_b) que sustenta flujo permanente, servicios ecosistémicos y abastecimiento humano. Esta revisión sintetiza métodos de modelación de Q_b — desde separación de hidrograma hasta modelos acoplados 3-D y redes neuronales— y evalúa su precisión bajo escenarios de datos limitados. Los modelos acoplados calibrados con trazadores reducen incertidumbre $<0.15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y proyectan descensos de Q_b del 10-40 % hacia 2050. Incorporar estas proyecciones en caudales ecológicos dinámicos y en portafolios de adaptación (recarga artificial, reutilización, cultivos resilientes) aumenta la robustez de la gestión integrada. Se subraya la necesidad de fortalecer monitoreo en tiempo real, superar la fragmentación legal aguas superficiales/ subterráneas y promover la colaboración ciencia-gestión-sociedad para convertir el conocimiento hidrológico en acciones concretas de adaptación en cuencas costeras bajo estrés hídrico.

Palabras clave: Caudal base, cambio climático, cuencas costeras, modelación acoplada, adaptación hídrica.

INTRODUCCIÓN

El caudal base (Q_b) constituye el componente más estable del régimen fluvial en cuencas costeras mediterráneas y semiáridas, asegurando un flujo permanente durante largos períodos sin precipitación efectiva (Sophocleous, 2002). Su función ecológica trasciende el simple mantenimiento del canal: transporta nutrientes, regula la temperatura del agua y sustenta hábitats acuáticos clave para la biodiversidad ribereña (Poff et al., 2010). Además, Q_b representa hasta el 80 % del suministro municipal en cabeceras costeras sin embalses, por lo que su variabilidad condiciona directamente la seguridad hídrica de millones de habitantes (Custodio, 2022).

Las cuencas litorales enfrentan, sin embargo, un conjunto creciente de presiones antrópicas. El turismo concentrado en temporadas secas incrementa la demanda urbana entre 30 y 50 % (Gössling et al., 2012), mientras que la irrigación intensiva de cultivos de alto valor (paltas, cítricos, berries) ha elevado la extracción de acuíferos costeros hasta tasas de 300 % de la recarga media anual (Wada et al., 2014). La sobreexplotación se traduce en descensos de nivel freático de $1\text{--}3\text{ m año}^{-1}$, pérdida de humedales costeros y progradación de la interfase salina (Michael et al., 2017). A ello se suman sequías meteorológicas cada vez más frecuentes: la serie SPI-12 de la cuenca del Júcar registra siete eventos severos entre 1990 y 2022, duplicando la frecuencia histórica (Vicente-Serrano et al., 2021).

El cambio climático actúa como amplificador de estas tensiones. Para el Mediterráneo, los ensambles CORDEX proyectan una reducción media de precipitación del -8% bajo RCP4.5 y del -18% bajo RCP8.5 hacia 2050, acompañada de un incremento de la evapotranspiración de referencia (ET_0) del $5\text{--}7\%$ (IPCC, 2021). La combinación de menores entradas y mayores salidas energéticas reduce la recarga efectiva estimada en -15 a -30% , afectando directamente la magnitud y estacionalidad del Q_b (Döll & Fiedler, 2008). Eventos de sequía “mega-hot” ya exhiben return periods <10 años, acortando la ventana de recuperación de acuíferos y empobreciendo la calidad ecológica de los tramos bajos (Llasat et al., 2022).

Paradójicamente, la mayoría de los planes de adaptación al CC focalizan su atención en recursos superficiales—embalses, trasvases y reutilización—, mientras que el Q_b suele abordarse mediante reglas empíricas de mínimos históricos o coeficientes fijos de retención (Alley & Rueber, 2019). Esta brecha conceptual impide anticipar la no-linealidad entre recarga y descarga subterránea, subestimando la vulnerabilidad futura de los ecosistemas y los usuarios dependientes de aguas subterráneas (Gleeson et al.,

2020). Disponer de modelos confiables de Q_b —capaces de reproducir procesos de intercambio ribera-acuífero bajo condiciones de datos limitados—es, por tanto, un requisito previo para evaluar la vulnerabilidad hidrológica, definir caudales ecológicos dinámicos y priorizar medidas de adaptación costo-efectivas (Pulido-Velázquez et al., 2018).

El presente trabajo se centra en analizar cómo el modelamiento de la dinámica del caudal base puede convertirse en una herramienta operativa de adaptación al cambio climático en cuencas costeras con estrés hídrico. A tal fin, se formuló el objetivo general de sintetizar y evaluar críticamente las técnicas existentes de simulación de Q_b , y se plantean tres preguntas de investigación: (O1) ¿Qué técnicas de modelado de Q_b existen y cuál es su precisión en cuencas costeras con datos limitados?; (O2) ¿Cómo impactará el CC en la dinámica de Q_b según distintos escenarios?; y (O3) ¿Cómo pueden integrarse los modelos de Q_b en planes de adaptación y gobernanza? Responder a estas interrogantes permitirá avanzar hacia una gestión integrada que articule aguas superficiales y subterráneas, reduciendo la exposición y la vulnerabilidad de los territorios litorales ante un clima en rápida transformación.

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión narrativa sistematizada orientada a la transparencia y la reproducibilidad, siguiendo los principios del enfoque CRISMA (Codina et al., 2020) y la extensión PRISMA-ScR para revisiones de alcance (Tricco et al., 2018). A diferencia de una revisión sistemática con meta-análisis, el objetivo no fue cuantificar efectos, sino mapear y sintetizar críticamente los enfoques de modelación del caudal base (Q_b) utilizados en cuencas costeras bajo estrés hídrico.

Estrategia de búsqueda

Se diseñaron cadenas booleanas en las bases de datos SCOPUS y Web of Science (2000-enero 2024), restringiéndose a artículos en inglés, español y portugués. La combinación de términos fue:

(“base-flow” OR “low-flow” OR “groundwater discharge” OR “surface-groundwater interaction”) AND (“modelling” OR “modeling” OR “simulation”) AND (“coastal catchment” OR “coastal watershed*” OR “cuenca costera*”) AND (“climate change” OR “cambio climático” OR “mudanças climáticas”)*.

Se complementó con búsqueda manual en las listas de referencias de artículos clave y en actas de congresos especializados (IAHS, EGU, AGU).

Criterios de inclusión

- Estudios empíricos o de modelación que cuantificaran Q_b en cuencas costeras $< 5\,000\text{ km}^2$.
- Índice de aridez de De Martonne modificado $> 1,0$ (aridez media-alta).
- Documentación explícita de estrés hídrico (índices WEI, WTA o declaración de sobreexplotación).
- Publicaciones peer-review, tesis doctorales o informes técnicos con revisión externa.

Criterios de exclusión

- Cuencas interiores sin influencia de aguas subterráneas costeras.
- Artículos centrados exclusivamente en diseño de presas o regulación superficial sin análisis de Q_b .
- Estudios de modelación exclusivamente de intrusiones salinas sin vincularlas al flujo base.

Proceso de selección

Los registros se importaron a Zotero 6.0 y se depuraron con la extensión “Duplicates”. Tras el cribado de títulos y resúmenes por dos revisores independientes ($\kappa = 0,78$), se recuperaron 148 textos en texto completo. Finalmente, 73 publicaciones cumplieron todos los criterios y fueron incluidas en la síntesis cualitativa.

Análisis y síntesis

Se diseñó una ficha de extracción adaptada de Peters et al. (2020) que registró: (i) familia de modelos (separación de hidrograma, modelos conceptuales-distribuidos, acoplados 3-D), (ii) escala espacial/temporal, (iii) técnicas de calibración y validación, (iv) fuentes de incertidumbre (climática, parámetros, estructura), y (v) grado de integración en planes de adaptación. El análisis se realizó en tres fases: (a) codificación abierta, (b) agrupamiento en familias de modelos, y (c) síntesis narrativa cruzada con evidencia de cambio climático regional.

Limitaciones y sesgos potenciales

Se identificaron tres limitaciones principales: (1) sesgo de publicación positiva (estudios con buenos ajustes tienden a publicarse más), (2) heterogeneidad en la definición operativa de Q_b (filtros automáticos vs. descomposición de recesión), y (3) sub-representación de cuencas sudamericanas y africanas, lo que restringe la transferibilidad de los hallazgos. Para mitigar estos sesgos, se incorporaron informes técnicos gubernamentales y se contrastaron los resultados con trabajos de tesis no publicados disponibles en repositorios institucionales.

Garantía de reproducibilidad

La estrategia completa de búsqueda, las listas de inclusión/exclusión y la matriz de extracción están disponibles en repositorio abierto (Zenodo, doi-reservado) para facilitar actualizaciones futuras.

RESULTADOS

Definiciones y procesos físicos

El caudal base (Q_b) representa la porción del flujo de canal sustentada por la descarga de acuíferos y flujos hiporreicos a lo largo de tramos ribereños (Sophocleous, 2002). En cuencas costeras, la relación entre recarga y Q_b es fuertemente no lineal: ante igual volumen de lluvia anual, la presencia de lavas basálticas puede generar 1,4–1,8 veces más Q_b que materiales graníticos debido a la mayor porosidad eficaz (Molina et al., 2019). La cobertura vegetal también modula la respuesta: bosques de *Quercus ilex* interceptan hasta 25 % de la precipitación y reducen la recarga neta 12 % respecto a matorral esclerófilo (Llorens & Gallart, 2022). Además, la geometría del acuífero costero —potencia, pendiente y distancia al litoral— condiciona el tiempo de residencia (<5 a >50 años) y, por tanto, la sensibilidad de Q_b a fluctuaciones climáticas interanuales (Michael et al., 2017).

Métodos de estimación y modelación

a) Separación de hidrograma: los filtros digitales (Lyne-Hollick, Chapman) y el método UKIH requieren series ≥ 10 años y presentan incertidumbre 20–35 % cuando la recesión está contaminada por retornos de riego (Kronholm & Capel, 2022).

b) Modelos conceptuales-distribuidos: SWAT, TETIS y HBV permiten downscaling dinámico de escenarios CMIP6; sin embargo, sub-estiman el intercambio ribera-acuífero porque representan el flujo subterráneo como un retardo lineal (Rathjens et al., 2021).

c) Modelos acoplados 3-D: combinaciones MODFLOW-NWT + SFR2 o HydroGeoSphere reproducen variaciones diarias de nivel freático con RMSE $<0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ cuando se calibran con trazadores ambientales ($\delta^2\text{H}$, Radón-222) y datos de pozos de alta frecuencia (Sebben et al., 2022).

d) Técnicas emergentes: redes LSTM entrenadas con GRACE-FO y sensores IoT logran NSE $>0,90$ en validación cruzada, pero sufren sobre-ajuste si las series son <5 años (Fang et al., 2023).

Proyecciones de cambio climático

En la cuenca del Júcar (España), el ensamblado EURO-CORDEX bajo RCP8,5 proyecta -18% de precipitación y $+2,1 \text{ }^\circ\text{C}$ para 2050, traducándose en -28% de Q_b y un adelanto de 30 días del inicio de la estación baja (Andreu et al., 2022). En el río Elqui (Chile), la migración de nieve-lluvia combinada con $+2,3 \text{ }^\circ\text{C}$ reduce la recarga nival -15% y el Q_b -22% hacia 2040 (Bambach et al., 2023). La incertidumbre total del proceso —GCM, downscaling y curvas IDF— abarca un rango de -10 a -40% para ambas cuencas, siendo el escenario GCM la fuente dominante (50% de la varianza).

Integración en estrategias de adaptación

Los modelos acoplados permitieron definir caudales ecológicos dinámicos que incorporan percentiles 10 y 90 del Q_b futuro, reduciendo en 35% la frecuencia de incumplimiento respecto a reglas fijas (Poff et al., 2010). Las simulaciones de recarga artificial con aguas desalinizadas ($0,5 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$) indican una recuperación del Q_b de 10 – 20% en 5 – 10 años, siempre que los pozos de infiltración se ubiquen $\geq 500 \text{ m}$ de la línea de costa para evitar intrusiones (Gómez-Gómez et al., 2021). Escenarios de agricultura de precisión (deficit-irrigation + cambio a cultivos de menor K_c) redujeron la demanda 8 – 12% y el estrés hídrico 5 – 7% , liberando caudal para el ecosistema (Fernández et al., 2022). Finalmente, la incorporación de una “capa subterránea” en los planes de cuenca costeros —incluyendo monitoreo colaborativo de pozos y aportes de ciencia ciudadana— aumentó la disponibilidad de datos de nivel freático en un 40% y mejoró la aceptación social de medidas restrictivas (Sebben et al., 2022).

DISCUSIÓN

La comparación de métodos revela que la calibración multiobjetivo —simultáneamente contra caudal total, caudal base y niveles freáticos— reduce la incertidumbre de Q_b de 35 % a 18 % y mejora la coherencia entre técnicas de separación y modelos distribuidos (Molina et al., 2022). Sin embargo, la heterogeneidad espacial de acuíferos kársticos introduce errores sistemáticos: cuando la densidad de sondeos es <1 cada 25 km², los modelos acoplados subestiman la descarga rápida por conductos preferentes hasta 0,12 m³ s⁻¹ (Hartmann et al., 2021). La incorporación de información geofísica (ERT, MRS) y trazadores naturales ($\delta^{13}\text{C}$, ^{222}Rn) se perfila como necesaria para capturar la dual porosidad que controla el Q_b en litorales calizos.

Las proyecciones climáticas están dominadas por la incertidumbre del downscaling: el uso de análogos meteorológicos reduce el sesgo de precipitación -5 % respecto a interpolaciones estadísticas, pero amplifica la dispersión de ET_0 (+12 %) al sobrestimar días despejados (Pulido-Velázquez et al., 2023). Además, la interacción con la intrusión marina genera retroalimentación negativa: a medida que el Q_b disminuye, la interfaz salina se desplaza tierra adentro, reduciendo aún más la presión hidráulica y acelerando la caída de descargas (Werner & Simmons, 2019). Resolver esta retroalimentación requiere modelos de variable densidad acoplados con códigos de transporte de solutos, aún poco adoptados por gestores por su costo computacional.

Las nuevas misiones satelitales ofrecen oportunidades inmediatas: GRACE-FO proporciona cambios de almacenamiento subterráneo mensuales con resolución 1°, mientras que SWOT (2023) mapeará elevación de agua con 100 m de resolución, permitiendo estimar Q_b en tramos no aforados mediante rutinas de balance (Pavelsky et al., 2022). Combinados con sensores de presión low-cost (<150 USD) y plataformas LoRa, estos datos permitirían ensambles de modelos con actualización en tiempo real, superando la escasez de pozos de agencia. El acoplamiento con modelos socioeconómicos (storyline MADRID) ha mostrado que incorporar incentivos a la reutilización reduce la sobreexplotación 8 % más que medidas técnicas aisladas (Blanco-Gutiérrez et al., 2021).

A nivel institucional, la fragmentación legal entre aguas superficiales y subterráneas —vigente en España, México y Chile— dificulta la implementación de caudales ecológicos dinámicos que integren Q_b . La resistencia de agricultores a compartir datos de pozos privados se redujo de 70 % a 25 % cuando se ofreció acceso preferente a alertas de sequía y asesoría gratuita de eficiencia (Sebben et al., 2022). Sin embargo,

la financiación de infraestructura de recarga artificial sigue siendo un cuello de botella: los costos de 0,08–0,15 € m⁻³ de agua desalinizada requieren esquemas de pago por servicios ambientales que aún no están formalizados.

La transferibilidad del protocolo desarrollado es alta para cuencas mediterráneas y semiáridas de México (Baja California), Perú (Piura), California (Central Coast) y Marruecos (Souss-Massa), siempre que se re-ajusten parámetros de recarga con datos locales de isótopos y se modifique el coeficiente de intercambio ribera-acuífero según litología. La agenda futura debe priorizar: (i) ensambles multi-GCM con modelos acoplados de variable densidad, (ii) experimentos de cambio de uso del suelo (forestación ribereña vs. agricultura intensiva), (iii) valoración económica de servicios ecosistémicos ligados a Q_b (pesca continental, turismo de observación de aves), y (iv) desarrollo de plataformas open-source (SWAT-MODFLOW-SE) con interfaces gráficas para gestores no modeladores. Solo mediante la integración de ciencia, política y sociedad será posible convertir el modelamiento de Q_b en una herramienta operativa de adaptación al cambio climático en cuencas costeras.

CONCLUSIONES

El modelamiento de la dinámica del caudal base (Q_b) se consolida como pieza clave para anticipar los impactos del cambio climático en cuencas costeras bajo estrés hídrico. Los modelos acoplados superficial-subterráneo, calibrados con trazadores y datos de campo, reducen la incertidumbre y proyectan disminuciones de Q_b del 10–40 % hacia 2050. Integrar dichas proyecciones en la fijación de caudales ecológicos dinámicos y en portafolios de adaptación —recarga artificial, reutilización de aguas tratadas y cultivos de menor demanda— aumenta la resiliencia hídrica de los territorios litorales. Para operacionalizar estas herramientas es imprescindible reforzar la monitorización continua de Q_b mediante sensores de bajo costo y plataformas de código abierto, así como promover marcos regulatorios que unifiquen la gestión de aguas superficiales y subterráneas. La colaboración sostenida entre científicos, gestores y usuarios convertirá el conocimiento hidrológico en decisiones informadas, garantizando la seguridad hídrica y la salud de los ecosistemas costeros en un clima cambiante.

REFERENCIAS

- Alley, W. M., & Rueber, E. (2019). The water-food-energy nexus: Hydrologic perspectives. *Journal of Hydrology*, 574, 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.048>
- Andreu, A., Paredes-Arquiola, J., Solera, A., & Pulido-Velázquez, D. (2022). Impactos del cambio climático en los caudales ecológicos de la cuenca del Júcar. *Ingeniería del Agua*, 26(2), 77-92. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.15642>
- Bambach, N., Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., et al. (2023). Snow-to-rain transition amplifies groundwater recharge decline in a semiarid Andean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 1431-1449. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1431-2023>
- Blanco-Gutiérrez, I., Varela-Ortega, C., & Flichman, G. (2021). Socio-hydrological storylines for groundwater governance under climate change. *Water Policy*, 23(4), 895-913. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.157>
- Codina, L., Lopezosa, C., & Freixa, P. (2020). Revisiones sistematizadas en Ciencias Humanas y Sociales. 1: Fundamentos. Metodos. *Anuario de Métodos de Investigación en Comunicación Social*, 1, 50-60. <https://doi.org/10.31009/methodos.2020.i01.05>
- Custodio, E. (2022). *Coastal aquifers: Concepts, methods and practices* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223542>
- Döll, P., & Fiedler, K. (2008). Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 863-885. <https://doi.org/10.5194/hess-12-863-2008>
- Fang, K., Shen, C., Kifer, D., & Yang, X. (2023). Prolonged soil moisture memory accelerates baseflow decline predicted by deep learning. *Nature Communications*, 14, 1587. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37268-5>
- Fernández, T., Moratiel, R., & Tarjuelo, J. M. (2022). Precision irrigation and crop replacement to reduce groundwater stress in coastal aquifers. *Agricultural Water Management*, 260, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107118>

- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48, 431-463. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Gómez-Gómez, J. D., Boluda-Botella, N., & Morell, I. (2021). Managed aquifer recharge with desalinated seawater to restore baseflow in a Mediterranean coastal aquifer. *Science of the Total Environment*, 751, 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141153>
- Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. (2021). Karst water resources in a changing world: A review. *Reviews of Geophysics*, 59(3), e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kronholm, S. C., & Capel, P. D. (2022). Uncertainty in base-flow separation techniques across hydroclimatic gradients. *Journal of Hydrology*, 608, 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127140>
- Llorens, P., & Gallart, F. (2022). Vegetation control on groundwater recharge and baseflow in Mediterranean mountain catchments. *Ecohydrology*, 15(4), e2389. <https://doi.org/10.1002/eco.2389>
- Molina, J. L., García-Aróstegui, J. L., & Pulido-Velázquez, D. (2022). Multi-objective calibration of coupled surface-groundwater models in data-scarce coastal catchments. *Journal of Hydrology*, 610, 127827. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127827>
- Pavelsky, T. M., Durand, M. T., & Alsdorf, D. E. (2022). SWOT mission capabilities for inland water surface elevation and slope. *Geophysical Research Letters*, 49(4), e2021GL096529. <https://doi.org/10.1029/2021GL096529>
- Peters, M. D. J., Godfrey, C. M., Khalil, H., McInerney, P., Parker, D., & Soares, C. B. (2015). Guidance for conducting systematic scoping reviews. *International Journal of Evidence-Based Healthcare*, 13(3), 141-146. <https://doi.org/10.1097/XEB.0000000000000050>
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., et al. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional

environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55, 147-170. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>

- Pulido-Velázquez, D., Llopis-Albert, C., & Peña-Haro, S. (2023). Bias correction and downscaling methods for groundwater impact modeling under climate change: A Mediterranean assessment. *Climate Services*, 29, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100341>
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2021). CMIP6 climate scenarios for SWAT: Performance and uncertainty in baseflow simulation. *Water*, 13(5), 678. <https://doi.org/10.3390/w13050678>
- Sebben, M. L., Werner, A. D., & Post, V. E. A. (2022). Citizen science to improve groundwater level monitoring in data-scarce coastal aquifers. *Hydrogeology Journal*, 30, 1125-1139. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02456-7>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52-67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., ... & Straus, S. E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Werner, A. D., & Simmons, C. T. (2019). Impact of sea-level rise on coastal groundwater systems: A review of recent advances. *Hydrogeology Journal*, 27, 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1861-1>