

ESCALAS DE TIEMPO DE TRANSPORTE EN UN EMBALSE ESTRATIFICADO CON MÚLTIPLES BRAZOS

Agustín Moreno¹ y Mauricio Toro²

¹ Magíster en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia. Coordinador Estudios y Diseños Hidrología, Hidráulica y Sedimentos SEDIC S.A.

² Profesor Titular Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.
E-mail: aamorenovar@gmail.com, aamoreno@unal.edu.co, fmtoro@unal.edu.co

Introducción

Las escalas de tiempo de transporte en un embalse dependen de los procesos de mezcla y transporte en él presentes, las cuales se desarrollan en diferentes escalas espaciales y temporales. Estas escalas han sido empleadas para comprender diversos procesos en limnología de embalses, como dinámica de poblaciones, propiedades químicas en cuerpos de agua, eutrofización, entre otros, por ello la importancia de su adecuada estimación, con el fin de apoyar el establecimiento de políticas de manejo apropiadas en cuerpos de agua como los embalses.

Zona de estudio

El embalse Riogrande II está localizado al noroccidente de Medellín (Colombia), aproximadamente en las coordenadas 75° 30' W y 6° 30' N, y es propiedad de Empresas Públicas de Medellín. El embalse tiene un volumen total hasta la cota de vertedero (2270 msnm) de 240 millones de metros cúbicos, recibe aportes principalmente de los ríos Grande (caudal medio de 29 m³/s) y Chico (caudal medio de 4.7 m³/s), y es empleado en la generación hidroeléctrica y para el abastecimiento del sistema de acueducto de diferentes municipios dentro del Valle de Aburrá.

Métodos

Se realizaron diversas campañas de muestreo donde se tomaron perfiles de temperatura del agua, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, transmisión de la luz, pH y turbiedad mediante un perfilador tipo CTD Seabird 25. Se muestreó también de forma continua la temperatura del agua en los ingresos de los ríos Grande y Chico, y en el embalse en dos sitios en su zona limnética, mediante el uso de cadenas dotadas de termistores HOBO pro v2 con una frecuencia de 15 minutos, y se monitorearon diversas variables meteorológicas con una frecuencia de 30 minutos utilizando una estación Davis Vantage Pro2. Los datos de caudales de ingreso, niveles del agua en torre de captación, y caudales efluentes, fueron suministrados por Empresas Públicas de Medellín.

Una alternativa apropiada para estimar los patrones de flujo de los afluentes al interior de un embalse es el uso de modelos hidrodinámicos y de transporte (Rueda, Fleenor, & de Vicente, 2007). En este caso se empleó el modelo hidrodinámico tridimensional para lagos y embalses "Estuary, Lake and Coastal Ocean Model" -ELCOM (versión 2.2), desarrollado por el Centre for Water Research (CWR) de la Universidad de Australia Occidental (Hodges y Dalimore, 2012).

Se empleó la definición de tiempo de residencia promedio de un trazador en un dominio ω propuesta por Takeoka (1984) (Ecuación 1) donde $M(t)$ es la masa remanente de trazador en

un tiempo t , y M_0 la masa de trazador finito contenida en ω en un tiempo inicial $t=t_0$. La fracción $r(t) = M(t)/M_0$ es la denominada función remanente, que físicamente representa la fracción de masa de trazador cuyo tiempo de residencia es mayor o igual a t (Camacho & Martín, 2013). $M(t)$ puede calcularse numéricamente con base en la concentración de trazador empleando la Ecuación (2), siendo $C(x,t)$ la concentración de trazador en un diferencial de volumen dV , en un tiempo t y en una posición x en el sistema.

$$\bar{\theta} = \int_{t_0}^{\infty} \frac{M(t)}{M_0} dt \quad [1]; \quad M(t) = \int_{\omega} C(x,t) dV \quad [2]$$

La solución de las integrales anteriores requiere en aplicaciones prácticas definir un umbral para la masa residual o remanente, ya que de lo contrario $M(t) = 0$ solo para un $t = \infty$. Diversos umbrales han sido definidos para el cálculo del tiempo de residencia empleando experimentos con trazadores numéricos, en este estudio se empleó un valor del 37% de M_0 para la caracterización del tiempo de renovación (T_r) (Gómez, Bárcena, Juanes, Ondiviela, & Sámano, 2014; F. Rueda et al., 2006), y del 5% de M_0 para aproximar el tiempo de residencia (Camacho y Martín, 2013).

Adicionalmente se estimó la edad del agua (o tiempo de retención) tratando dicha variable como un trazador, con el fin de estimar su comportamiento espacial a través de un dominio. Para ello se empleó el ELCOM simulando períodos de tiempo mayores al tiempo de residencia hidráulico teórico del embalse (72.8 días; Estrada, 2006).

Resultados

Las simulaciones hidrodinámicas empleando el modelo ELCOM (calibrado y validado), mostraron que para las condiciones hidrológicas y operativas presentes en el embalse Riogrande II en el período 21/10/2011 a 18/10/2012, el tiempo de renovación del embalse es del orden de 63.5 días, mientras que el tiempo de residencia se estimó en 262 días (Figura 1), valor lejano a los 72.8 días estimado con la relación básica Q/V (Q caudal afluente constante para el volumen V del cuerpo de agua).

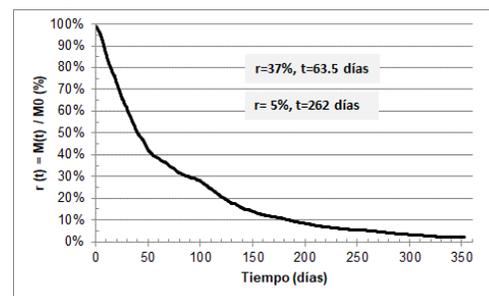


Figura 1.- Función remanente embalse Riogrande II período 21/10/2011 a 18/10/2012.

En el período en donde se construyó la función remanente, se encontró que las extracciones realizadas para generación hidroeléctrica fueron las que más contribuyeron a la variación de la masa de agua en el embalse (Figura 2). Se resalta el papel del vertedero de excesos, ya que se consideró su contribución es importante en magnitud, siendo que su funcionamiento se dio el 9.5% del tiempo simulado, mientras que la descarga de fondo lo hizo el 65% del tiempo, y ambos extrajeron cantidades de masa comparables.

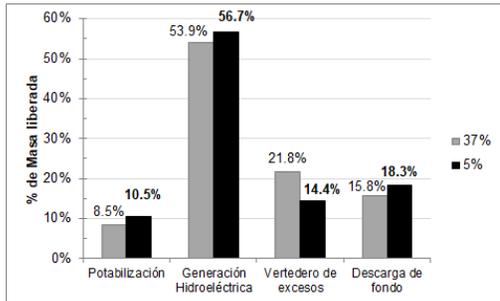


Figura 2.- Distribución de la masa de trazador extraída por las estructuras de salida del embalse, en el período de construcción de la función remanente.

Lo anterior se explica en la naturaleza encañonada del embalse, donde volúmenes importantes se almacenan en las cotas altas utilizando profundidades bajas, así, el epilimnio, que para Riogrande II ocupa profundidades entre los 4 m y 6 m de profundidad, conforma una porción importante del volumen total en el tiempo cero de simulación, que por la inhibición a la mezcla vertical que ocasiona la estratificación térmica, sale del embalse preferencialmente por el vertedero de control de excesos, y no por las restantes estructuras de captación o descarga, que por lo general se encuentran por debajo del epilimnio.

La Figura 3 muestra la gran heterogeneidad espacial que tienen las escalas como el tiempo de retención (o edad del agua), favorecida por la estratificación térmica, en conjunto con el patrón variable del ingreso de los afluentes como corrientes intrusivas o de fondo, y el comportamiento difusivo que suele mostrar las corrientes asociadas al río Chico.

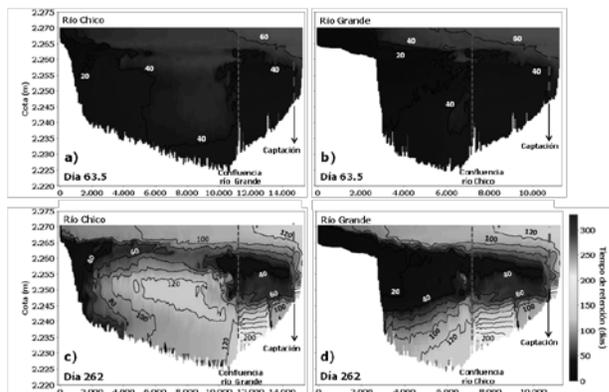


Figura 3.- Distribución espacial del tiempo de retención, a) brazo del río Chico para el tiempo de renovación estimado, b) brazo del río Grande para el tiempo de renovación estimado, c) brazo del río Chico para el tiempo de residencia estimado, d) brazo del río Grande para el tiempo de residencia estimado.

Lo anterior potencia la existencia de zonas en las partes medias y bajas de los brazos del río Chico y Grande, que

poseen tiempos de retención similares a los alcanzados en la zona superior de la columna de agua, donde se aloja el epilimnio del embalse.

Conclusiones

Las estimaciones realizadas muestran que, no es apropiado la estimación del tiempo de residencia a partir de aproximaciones generales como las que emplean la simple relación entre un caudal medio constante en alguna escala de tiempo, con el volumen del embalse, para cuerpos de agua que como Riogrande II, cuando estos poseen patrones de circulación complejos, dados como en este caso, por su carácter estratificado, al igual que por su naturaleza ramificada, y por el efecto que sobre la circulación poseen las estructuras de descarga del embalse.

El cambio de masa al interior del embalse, y por ende de sus escalas de transporte como el tiempo de residencia y la edad del agua, es determinada en su mayoría por el régimen de extracción para generación hidroeléctrica, y se ve impactadas de forma importante en las temporadas donde se presentan descargas por el vertedero de excesos.

Referencias

- Camacho, R. A., & Martin, J. L.** (2013). "Hydrodynamic Modeling of First-Order Transport Timescales in the St. Louis Bay Estuary, Mississippi". *Journal of Environmental Engineering*, 139(3), 317-331.
- Estrada, A.** (2006). "Variación de la estructura y la distribución del zooplancton en función de gradientes longitudinales abióticos y bióticos en el embalse Riogrande II (Antioquia)", Colombia. Tesis Doctorado, Universidad de Antioquia.
- Gómez, A. G., Bárcena, J. F., Juanes, J. A., Ondiviela, B., & Sámano, M. L.** (2014). "Transport time scales as physical descriptors to characterize heavily modified water bodies near ports in coastal zones". *Journal of Environmental Management*, 136, 76-84.
- Hodges, B., & Dallimore, C.** (2012). Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM, v2.2 User Manual.
- Rueda, F. J., Fleenor, W. E., & de Vicente, I.** (2007). "Pathways of river nutrients towards the euphotic zone in a deep-reservoir of small size: Uncertainty analysis". *Ecological Modelling*, 202(3-4), 345-361.
- Rueda, F., Moreno-Ostos, E., & Armengol, J.** (2006). "The residence time of river water in reservoirs". *Ecological Modelling*, 191(2), 260-274.
- Takeoka, H.** (1984). "Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea". *Continental Shelf Research*, 3 (3), 311-326.