

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**SEGUIMIENTO DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN LA
ZONIFICACIÓN DE UN EMBALSE MONOMÍCTICO EUTRÓFICO**

Ana Clara Jimenez^{1,2}, Rocío Luz Fernandez^{1,2}, Alejandra Bustamante² y Andrés Gómez-Giraldo³

⁽¹⁾Departamento de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba, Bv. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba 5000, Argentina. E-mail: rocioluz@efn.uncor.edu. ⁽²⁾ Centro de la Región Semiárida, Instituto Nacional del Agua, Vélez Sarsfield 1611, Córdoba 5000, Argentina. ⁽³⁾ Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia.

RESUMEN:

El trabajo explora el uso de distintos parámetros para la zonificación de un embalse eutrófico de tamaño medio. Basado en información *in-situ* y simulaciones numéricas, se analiza la relación entre escalas de tiempo y los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en el cuerpo de agua. En particular, se analiza el tiempo de residencia con variación estacional, el cual resulta comparable con las escalas de tiempo de las variaciones propias del sistema.

En general, el seguimiento de los distintos parámetros que se proponen en este trabajo conduce a un mejor entendimiento de la variabilidad de cada uno de ellos, como también del funcionamiento integral del embalse.

ABSTRACT:

This manuscript explores the application of different parameters in the zonification of an eutrophicated medium-sized reservoir. Based on in-situ data and numerical simulations, it analysis the links between time scales and the underlying hydrodynamic processes in the water body. Particularly, seasonal residence time variations are analysed, which results comparable to the time scales of the system variability itself.

In general, the application of the different parameters proposed in this manuscript allowed a better understanding of each process associated to each of them, but also it collaborated to the integral understanding of the system.

PALABRAS CLAVES: tiempo de residencia, embalse, zonificación

INTRODUCCIÓN

Las condiciones meteorológicas a las que están sometidos los lagos y embalses dan lugar a regímenes hidrodinámicos que condicionan los procesos químicos y biológicos que se desarrollan en él. Así, las limitaciones de los procesos de mezcla dentro de cuerpos de agua se manifiestan a través de la presencia de gradientes químicos y biológicos como por ejemplo la concentración de oxígeno, sedimentos, fósforo, nitrógeno, clorofila, entre otros.

En embalses que llegan a estratificarse la circulación puede quedar restringida a diferentes regiones en el cuerpo de agua, tanto en la dirección horizontal como en la vertical, y por tanto, el tiempo que el agua reside o permanece en las distintas zonas es diferente. El tiempo de residencia varía según la geometría del embalse, profundidad, extensión, irregularidades locales, como también de su régimen de estratificación estacional.

Existen en la literatura diversos parámetros indicadores que estiman la permanencia del agua en un cuerpo de agua, como por ejemplo: tiempo de residencia, tiempo de salida del agua, “flushing time”, “e-folding time”, “water age”, entre otros. En este trabajo se incluyó el análisis de los siguientes parámetros:

Tiempo de intercambio del agua: Se define como la relación entre el volumen total del embalse, V , y el flujo medio Q que entra o sale del mismo, a saber:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad [1]$$

“E-Flushing Time”: Es el tiempo requerido para que la masa del trazador contenida en el embalse sea reducida un factor $1/e$, según la siguiente ecuación:

$$C(t - t_0) = C_0 e^{-\frac{Q}{V}(t-t_0)} = C_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{\theta}} \quad [2]$$

Donde Q es en flujo de la sustancia (entrando o saliendo), V es el volumen de control considerado, t es el tiempo y θ es el “e-flushing time”.

“Water age”: Una partícula que entra a un cuerpo de agua por primera vez en el tiempo t_0 y en una localización α , describirá una trayectoria $x(\alpha, t, t_0)$ y abandonará el cuerpo de agua en el tiempo t_n . La porción del tiempo entre el tiempo t_0 y el tiempo del primer arribo a un punto dentro del sistema x_0 es definido como la edad (“water age”) de la partícula (Rueda, 2005).

Tiempo de salida del agua: Es el tiempo que una parcela de agua necesita para salir del embalse. El mejor método para estimar el parámetro es el uso de un modelo de trazador Lagrangiano. El método consiste en seguir el movimiento de una partícula, asumiendo que la trayectoria de la misma es representativa de la que sigue la parcela inicial. Este es un parámetro de tiempo local ya que está definido para cada punto (Jouon, 2005).

OBJETIVOS

En este trabajo se busca caracterizar las distintas zonas del embalse a través de la evaluación de parámetros físicos químicos y biológicos. En particular, se considera a los indicadores del tiempo de permanencia del agua del embalse con mayor detalle.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como herramienta numérica se utiliza el modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM (*Estuary and Lake Computer Model*) desarrollada por el Centro de Estudios del Agua de la Universidad Occidental de Australia.

El lugar de estudio es el Embalse San Roque, situado en el Valle de Punilla (31° 22' 56" S, 64° 27' 56" O), a 600 msnm, entre las Sierras Grandes y las Sierras Chicas en la Provincia de Córdoba, Argentina. Su cuenca de drenaje está formada por las subcuencas del Río San Antonio de

500 km², Río Cosquín de 820 km², Arroyo las Mojarras de 85 km² y Arroyo los Chorrillos de 160 km², siendo la única erogación el caudal del Río Suquía (Figura 1).

Se ha seleccionado para este trabajo como periodo de estudio el año hidrológico comprendido entre 15 de septiembre de 2003 al 15 de septiembre de 2004 dado que el mismo se corresponde con un periodo de bajo nivel del embalse. Presentándose 325 días una cota inferior a la del vertedero con un promedio anual de 641 msnm 2 m debajo del vertedero. La Figura 2 muestra los caudales de entrada-salida y las precipitaciones a lo largo del año hidrológico en estudio, conjuntamente con los perfiles de temperatura medidos en campo. Los menores niveles embalsados se presentan en primavera, en verano son mayores y se observa estratificación los meses de diciembre y enero. Para otoño corresponden los máximos volúmenes embalsados y se observa mezcla completa.

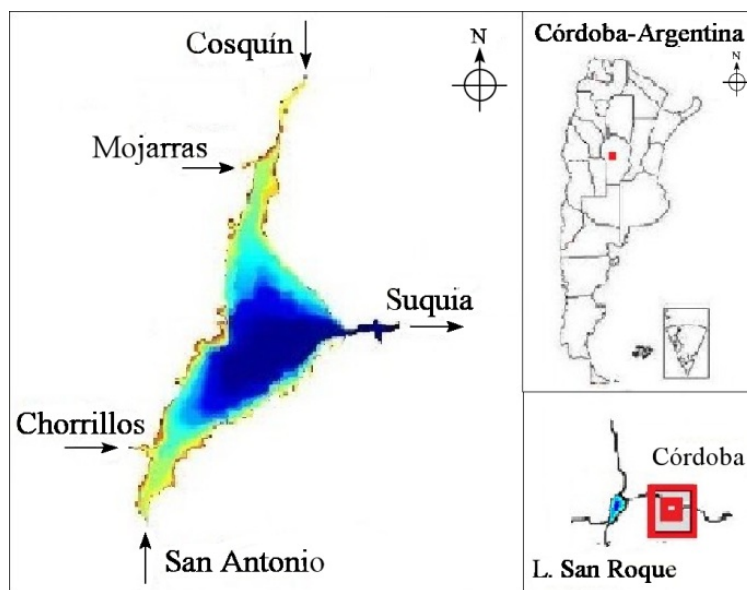


Figura 1.-Embalse San Roque, Córdoba, Argentina

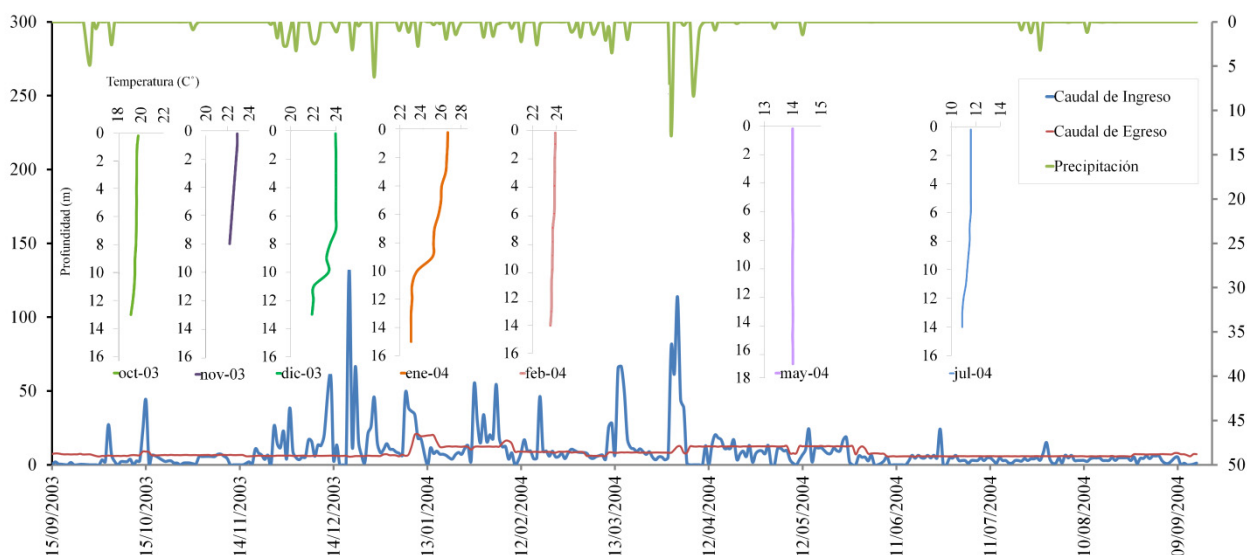


Figura 2.-Caudales, precipitación y perfiles de temperatura en el año hidrológico

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Tanto en su dimensión vertical como horizontal los embalses pueden presentar gran variabilidad en cuando a su hidrodinámica y en consecuencia en cuanto a sus características químicas y biológicas, encontrándose gradientes de concentraciones de algunos parámetros, como

la transparencia dada por el disco secchi, clorofila y total de solidos disueltos (Figura 3a, 3b y 3c) o nutrientes dado por las algas, fosforo y nitrógeno (Figura 4a, 4b, 4c).

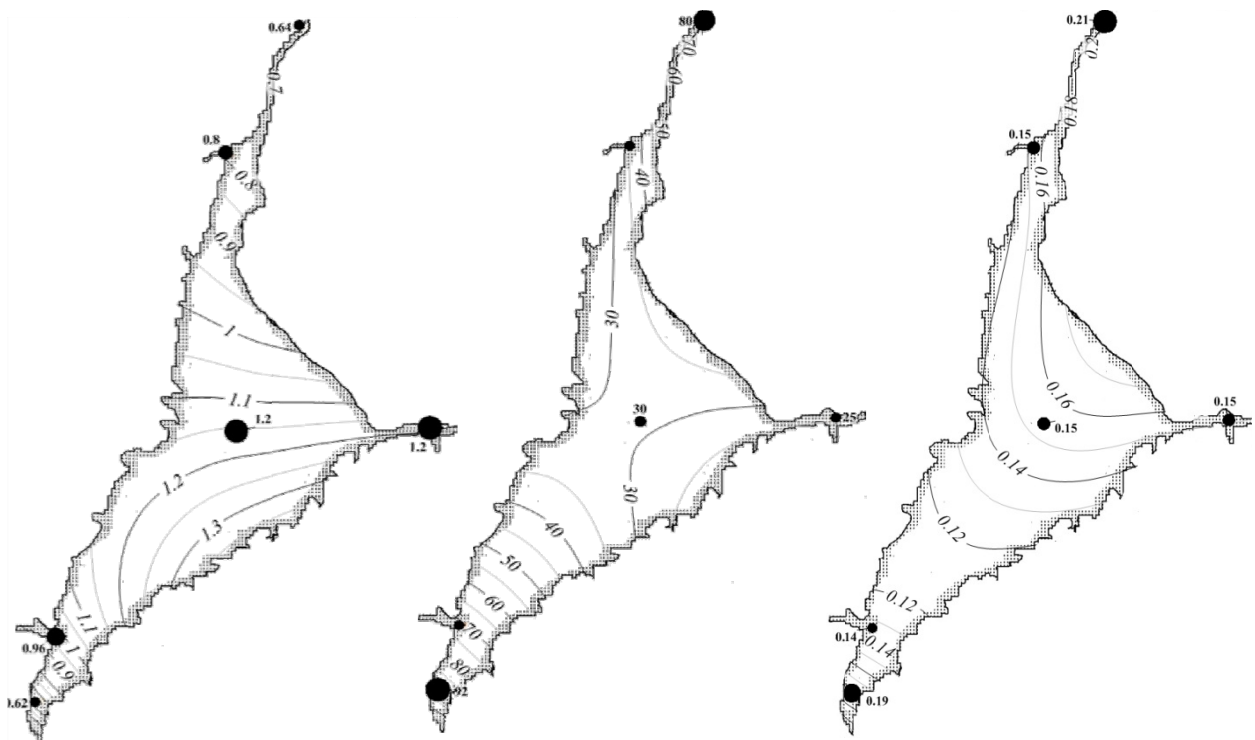


Figura 3.- a) Profundidad del disco Secchi, b) Clorofila, y c) Total de sólidos disueltos. El círculo en negro indica el lugar donde se tomaron las muestras y el tamaño es proporcional al resultado obtenido de ellas.

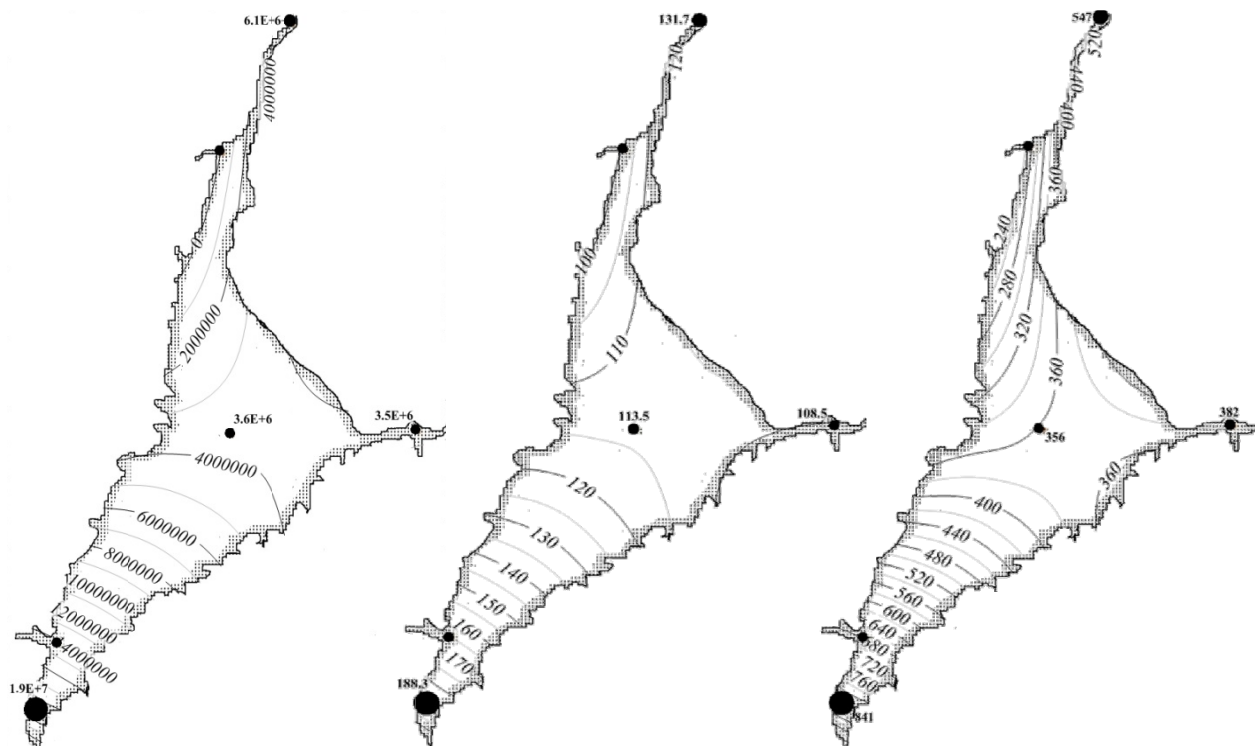


Figura 4.- a) Algas, b) Fósforo y c) Nitrógeno. El círculo en negro indica el lugar donde se tomaron las muestras y el tamaño es proporcional al resultado obtenido de ellas.

Existen fuertes descensos en la concentración de oxígeno en la profundidad desde diciembre a marzo. Las menores se presentan en enero llegando a la anoxia a partir de los 10 m. Este periodo coincide con aquel en que el embalse se encuentra estratificado (Figura 5).

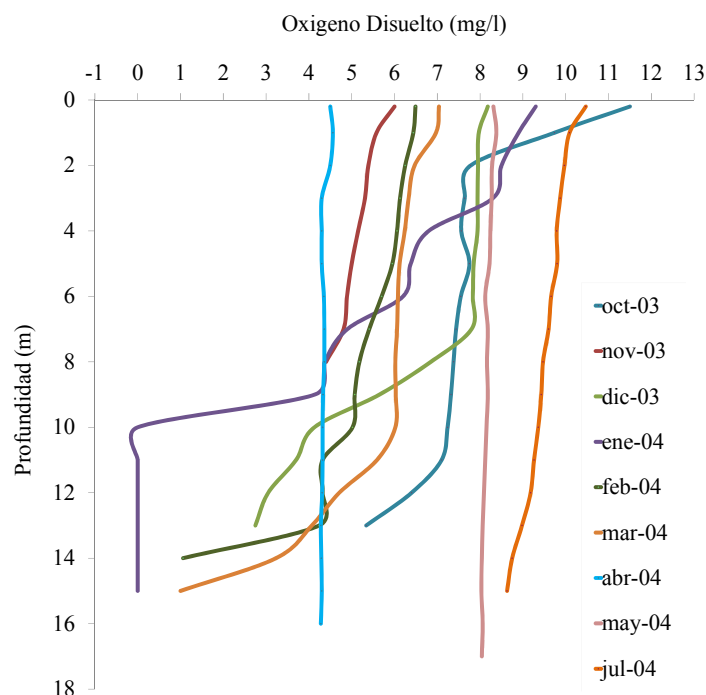


Figura 5.-Perfiles de oxígeno disuelto en el centro del embalse

En cuanto a la dimensión horizontal la literatura identifica tres zonas cada una con características propias a) Cola del embalse, con características de un río b) Transición. c) Cabeza, con características propias de una zona lacustre. En este contexto, la Tabla 1 resume los parámetros que se utilizaron para la zonificación del embalse en este trabajo. Los valores corresponden al promedio anual de parámetros físicos, químicos y biológicos que se midieron en campo según las distintas zonas del embalse.

Tabla 1.- Indicadores físicos, químicos y biológicos

Indicador	Fluvial Cosquín	Transición Cosquín	Lacustre	Transición San Antonio	Fluvial San Antonio
Tiempo de permanencia [d]	44	64	68	65	61
Clorofila [$\mu\text{g/l}$]	60	27.5	30.21	55.5	84
Disco Secchi [m]	0.7	0.85	1.11	1.07	0.7
Sólidos disueltos [TDS]	0.175	0.155	0.147	0.132	0.191
Total de Algas [cel/l]	3 e6	1.73 e6	4.31 e6	11.44 e6	19.1 e6
Fósforo [$\mu\text{g/l}$]	111.67	102.97	118.16	156.58	189.17
Nitrógeno [$\mu\text{g/l}$]	400	275.93	378.90	791.67	883.33

TIEMPO DE PERMANENCIA

De los parámetros listados en Tabla 1, dada la importancia del tiempo de permanencia del agua dentro del embalse por su relación con los procesos químicos y biológicos, se considera a continuación la evaluación de los distintos criterios que existen para su determinación, ya mencionados al comienzo de este trabajo.

Tiempo De Intercambio Del Agua: Considerando el caudal erogado en la expresión (1), se identifican en la Figura 6 sólo tres valores bien diferenciados a lo largo del año. El primero, desde el 1 de junio al 15 de septiembre corresponde a tiempos de intercambio entre 11 y 12 meses. Un segundo periodo desde el 1 de abril al 1 de junio, aproximadamente 6 meses y el tercer periodo que transcurre entre el 15 de septiembre del 2003 y el 1º de abril de 2004, valores intermedios; 7 meses

inicialmente llegando a 8 hacia el final. Si en cambio se considera el caudal de ingreso en la expresión (1), el parámetro presenta amplia variabilidad, desde unos pocos meses en la temporada húmeda, hasta varios años en temporada seca.

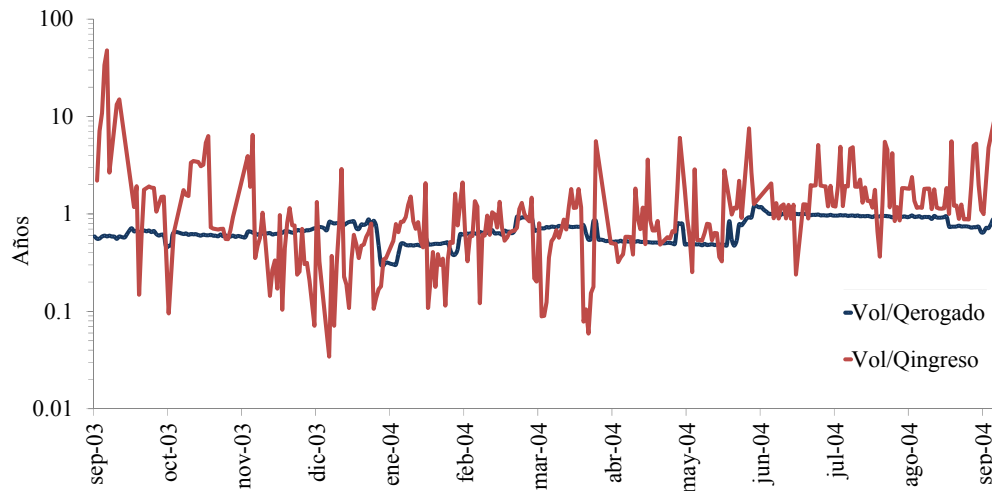


Figura 6.- “Tiempo de intercambio del Agua” considerando caudal de ingreso y egreso en la expresión (1).

“E-Flushing Time”: Con el uso del modelo ELCOM, de la modelación de trazadores liberados en Cosquín y San Antonio y a partir de la máxima concentración alcanzada en cada una de las zonas (fluvial, transición y lacustre) se evalúa su decrecimiento. Las concentraciones se aproximan con una función exponencial negativa para cada zona (Figuras 7, 8, y 9). Una disminución de 1/e en la concentración representa aproximadamente un 35% de la inicial, por lo tanto el parámetro “e-flushing time” se encuentra deduciendo de la función exponencial los días necesarios para alcanzar la concentración con dicho porcentaje. La Tabla 2 muestra los valores para cada zona.

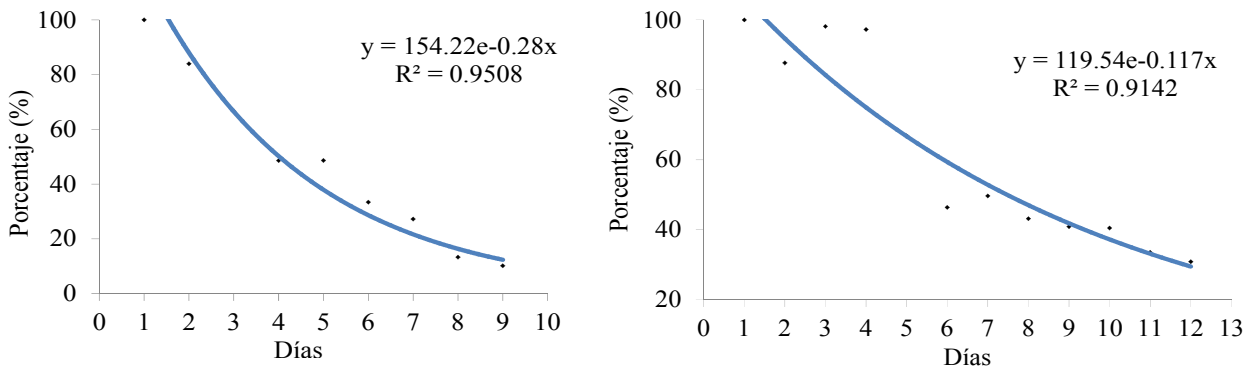


Figura 7.- Zona fluvial y transición del río Cosquín

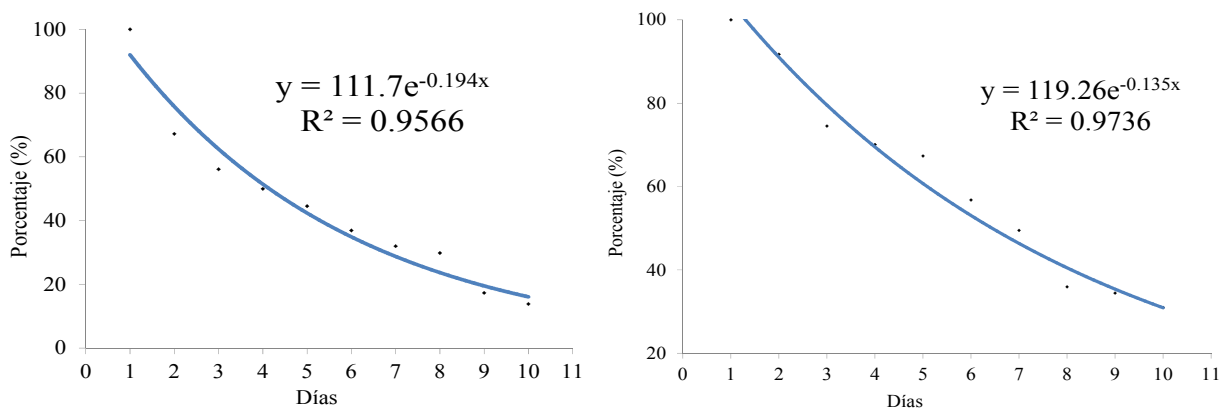


Figura 8.- Zona fluvial y transición del río San Antonio

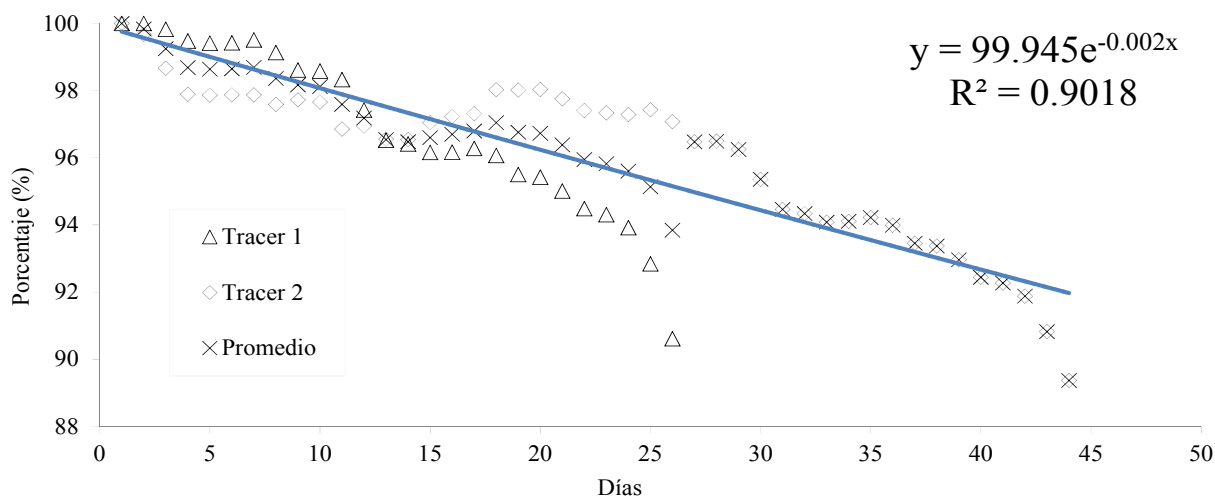


Figura 9.- Zona Lacustre

Tabla 2.- “e-flushing time” para cada zona

Zona	e-flushing time [días]	e-flushing time [meses]
Fluvial Cosquín	5.3	0.2
Transición Cosquín	10.5	0.3
Lacustre	524.6	17.5
Transición San Antonio	9.1	0.3
Fluvial San Antonio	6.0	0.2

“**Water Age**”: Se observa un corte longitudinal desde la entrada de los afluentes Cosquín y San Antonio hasta la zona de erogación para las variables “water age” y las concentraciones de fósforo y nitrógeno a lo largo del perfil, valores promediados en el periodo modelado (Figuras 10 y 11). La variable “water age” crece mientras que las concentraciones de fósforo y nitrógeno decrecen a medida que se avanza a zonas más profundas del embalse. Analizando la variable de tiempo se observa que las zonas fluviales y de transición de los afluentes difieren respectivamente en cuanto a la edad del agua que allí se encuentra. Para el río Cosquín existe un claro cambio gradual al pasar de una zona a la otra y por otro lado para el río San Antonio esto no ocurre ya que se observa que la edad del agua en las tres zonas en promedio no difieren demasiado.

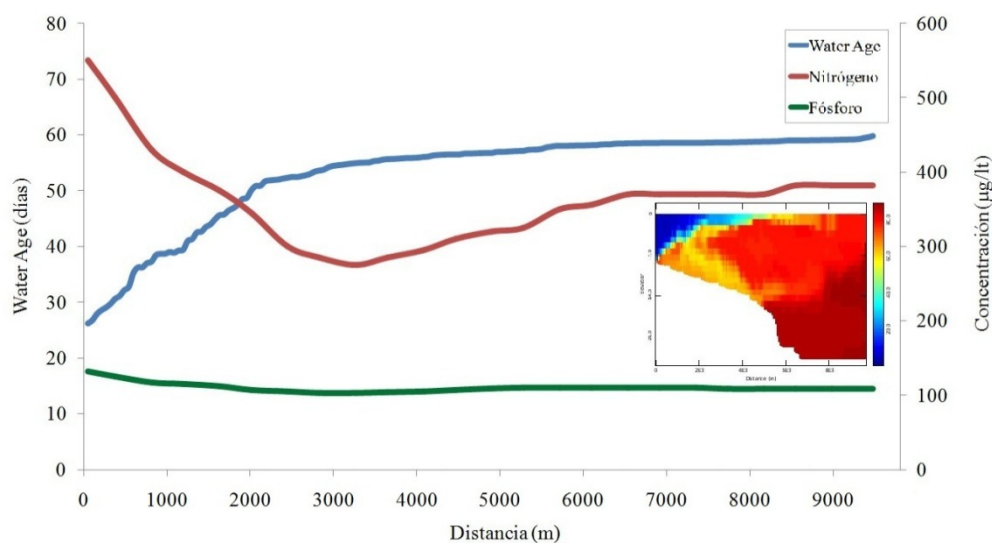


Figura 10.- “water age” y concentraciones de P y N desde el ingreso del río Cosquín a zona de salida

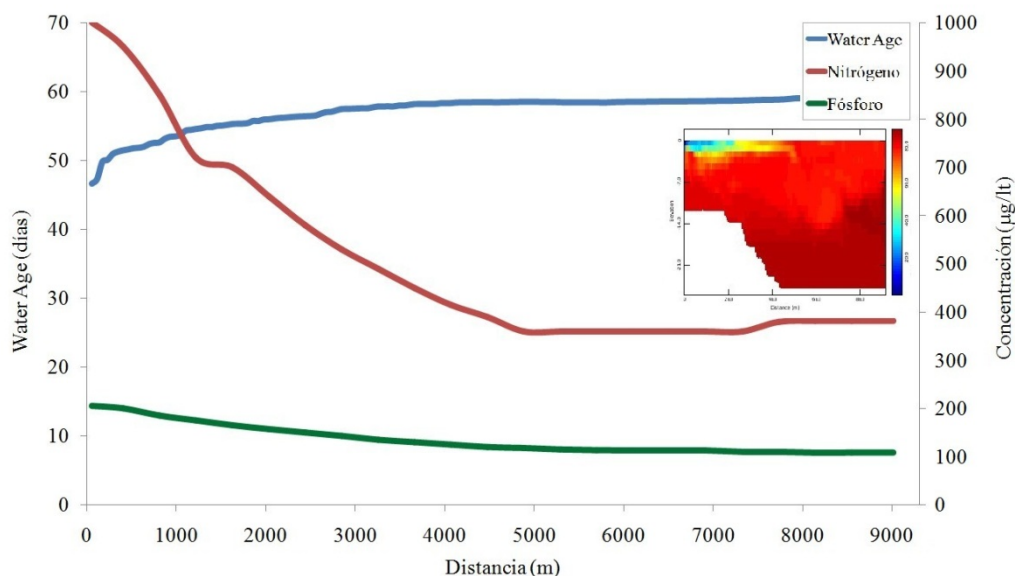


Figura 11.- “water age” y concentraciones de P y N desde el ingreso del río San Antonio a zona de salida

En zona fluvial y transición del río San Antonio se observan niveles de nitrógeno de casi el doble a los encontrados en dichas zonas del río Cosquín. En general en ambos casos decrecen rápidamente los primeros 4 km para hacerse casi constantes dentro de la zona lacustre. Respecto a los niveles de fósforo el embalse se presenta casi homogéneo, la zona fluvial y transición de río Cosquín presenta valores muy similares a los lacustres mientras que en el San Antonio en dichas zonas se observan valores ligeramente superiores.

La Tabla 3 muestra la variable “water age” en distintas épocas del año a fin de evaluar el impacto que tienen las distintas condiciones del embalse en la permanencia del agua. El embalse los meses noviembre y diciembre posee los menores volúmenes y en este último también se observa estratificación por otro lado en agosto se presenta con volúmenes medios y mezcla completa. En base a estas características los valores de la variable “water age” que corresponden a agosto son mayores dado el mayor volumen embalsado, pero valores superiores se presentan en el mes de diciembre a pesar de tener los menores volúmenes posiblemente por la estratificación la cual impide la mezcla y por consiguiente la renovación.

Tabla 3.- "water age" promedio para las distintas zonas del embalse

Zona	Noviembre	Diciembre	Agosto
Fluvial Cosquín	45	43	45
Transición Cosquín	57	70	58
Lacustre	59	77	60
Transición San Antonio	57	73	59
Fluvial San Antonio	55	67	56

Tiempo de salida del agua: Para analizar la variable se liberan tres trazadores, en el río Cosquín, en el río San Antonio y un tercero en la zona más profunda del embalse los tres el día 15 de octubre para evaluar el comportamiento de estos frente a la acción hidrodinámica interior del embalse. Se elige este día pues se observa un aumento repentino de caudal y posteriormente caudales bajos, por lo tanto el trazador casi no se veía afectado por la turbulencia de fuertes caudales de entrada. Las Figuras 12 y 13 representan promedios en profundidad de concentraciones del trazador 1 y 2. La Figura 15 son concentraciones del trazador 3 promediadas en planta encontradas en 3 profundidades.

El trazador 1 liberado en Cosquín permanece en la zona fluvial cerca de 40 días después de los cuales se registran valores inferiores de un 1% de la máxima concentración. A la zona de transición ingresa 1 día después de la liberación después de 40 días la concentración disminuye a un

15% de la máxima concentración registrada en ésta misma zona. En la zona lacustre el trazador ingresa un día después de la liberación, 55 días después la concentración solo disminuyo 5% de la máxima registrada en esta zona.

El trazador 2 liberado en San Antonio permanece en esta zona cerca de 40 días después de los cuales se registran valores inferiores de un 3% de la máxima concentración. A la zona de transición ingresa el mismo día de la liberación después de 30 días la concentración disminuye a un 10% de la máxima concentración registrada en esta misma zona. En la zona lacustre el trazador ingresa un día después de la liberación, casi 50 días después, la concentración solo disminuyo 5% de la máxima registrada en esta zona.

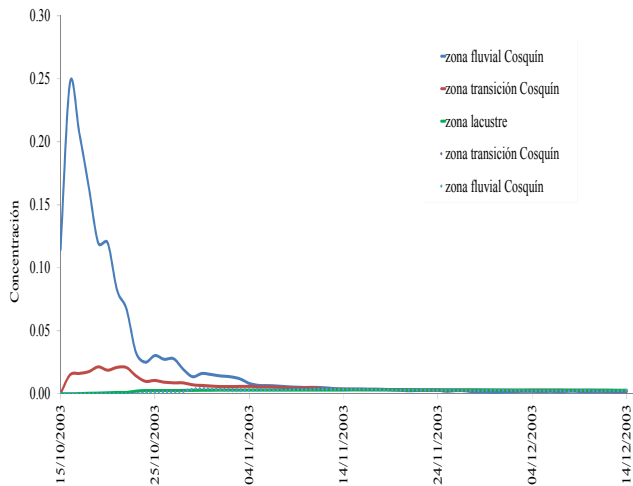


Figura 12.-T1 liberado en el río Cosquín

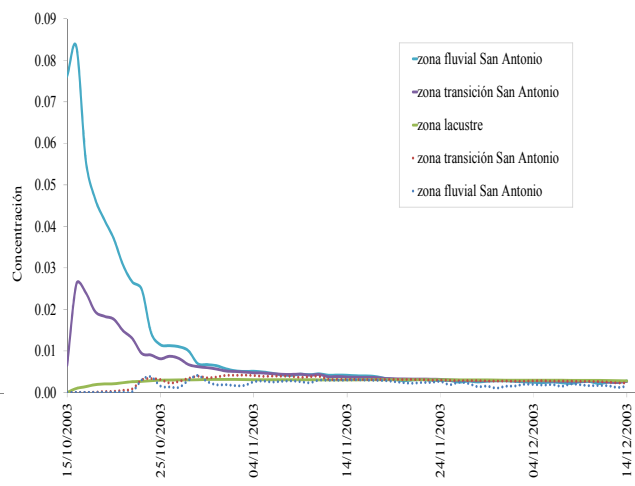


Figura 13.- T2 liberado en el río San Antonio

Para evaluar el transporte de la partícula en la dimensión vertical se libera un trazador 3 a 23 m de profundidad en el centro del embalse. Analizando su comportamiento se llega a determinar que el trazador sube a los 18 metros de profundidad al día siguiente de la liberación. Abandona la profundidad de 18 m después de casi 1 mes para pasar a capas superiores del embalse como puede verse a los 10 metros de profundidad y en la superficie poco tiempo después (Figura 14). A partir de este momento el promedio de las concentraciones en las tres profundidades es similar hacia el final del periodo modelado (Figura 15).

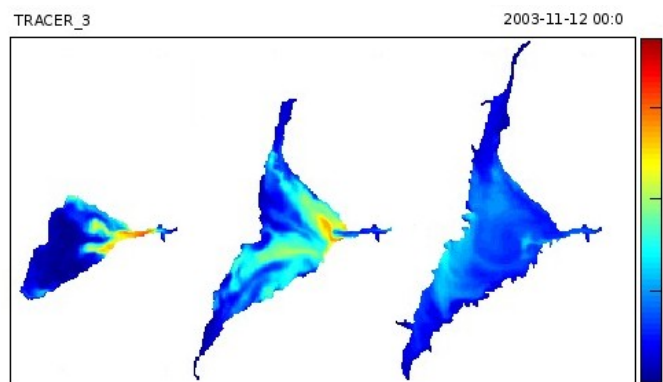


Figura 14.- T3 a 18m, 10m y a nivel superficial

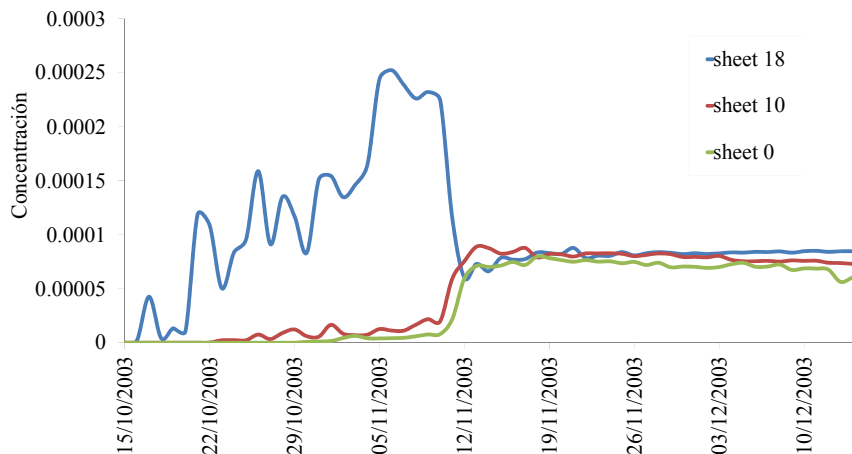


Figura 15.- Concentración del trazador 3 a los 18m 10m y a nivel superficial.

CONCLUSIÓN

El parámetro tiempo de intercambio del agua está fuertemente relacionado tanto a la hidrología en las cuencas de aporte como a la operación del embalse por ello se debe seleccionar cuidadosamente los datos que intervienen en la expresión 1. Estos no deben corresponder a caudales pico que no son representativos de las condiciones normales en el embalse. Por otro lado el parámetro no expresa variabilidades locales asique no sería apropiado para reservorios con morfología demasiado irregular que lleve a altas variabilidades hidrodinámicas dentro reservorio. El parámetro “e-flushing” en este caso es buen indicador de los tiempos locales pero depende de una función de aproximación que en este caso difiere de la expresión 2 pero aproxima mejor a los porcentajes del modelo.

El parámetro “water age” es buen indicador de la edad del agua en las zonas fluvial y transición pero para la zona lacustre posiblemente no sea apropiado pues el modelo tiene una limitación de longitud máxima para el periodo modelado y puede ocurrir que el tiempo de permanencia en zona lacustre supere ese límite. Este parámetro es el mejor para establecer una relación directa entre el tiempo que permanece el agua dentro de cada zona y las escalas de tiempo ecológicas. En el caso de tiempo de salida de agua se obtuvieron valores muy similares a la variable “water age” para el caso de la zona fluvial y transición en ambos ríos, sin embargo para la zona lacustre se obtuvieron valores más altos quizás mas cercanos a la realidad. Posiblemente la zona lacustre sea más apropiada de ser modelada por esta variable ya que puede estudiarse más fácilmente la mezcla vertical en las zonas más profundas del embalse y la influencia de la estratificación en el transporte del trazador.

REFERENCIAS

- Fischer, H.B., List, J.E., Koh, R.C., Imberger, J., & Brooks, N.H. (1979).** *Mixing in Inland and Coastal Waters*. United States of America: Academic Press, Inc.
- Jouon, A., Douillet, P., Ouillon, S., Fraunié, P. (2005).** “Calculation of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model” *Journal of Continental Shelf Research* 26, 1395-1415.
- Rueda, F., Moreno-Ostos, E., Armengol, J. (2005).** “The residence time of river water in reservoirs” *Journal of Ecological Modelling* 191, 260-274.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de la Región Semiárida, sede del Instituto Nacional del Agua en Córdoba y a la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba por aportar datos utilizados en el presente trabajo.