

Caracterización física y química del embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia

Limnological characterization of Riogrande II Reservoir (Antioquia), Colombia

David Mazo-B.^{1, 3}, John J. Ramírez-Restrepo^{1, 4}, Abel Díaz-C.^{2, 5}

Resumen

En esta investigación se caracteriza el embalse Riogrande II desde las perspectivas climática, física y química. Con este fin se midieron dos variables climatológicas (viento y pluviosidad), seis físicas (temperatura del agua, atenuación vertical de irradiación descendente, sólidos suspendidos y disueltos, conductividad eléctrica, turbidez) y cuatro químicas (oxígeno disuelto, CO₂ libre, pH, alcalinidad). Dichas cuantificaciones se realizaron durante un año en cinco estaciones entre las que río Chico arriba fue diferente de las demás por presentar valores altos tanto de materiales en suspensión como de todos los descriptores medidos. En el eje gravedad-luz el embalse estuvo estratificado todo el tiempo de muestreo, con afloramiento del agua metalimnética dentro la capa superficial, y con hipolimnio anóxico durante todo el año de muestreo en todas las estaciones. Se considera que el embalse Riogrande II presenta un patrón atelomíctico de mezcla.

Palabras clave: Colombia, limnology, tropical reservoir, caracterización física y química

Abstract

In this investigation Riogrande II reservoir is characterized from the climatic, chemical, and physical perspectives. With this aim were measured two climatic variables (rainfall and wind), six physical (temperature, vertical attenuation for upwelling irradiance, suspended solids, dissolved solids, turbidity, electrical conductivity) and four chemical (dissolved oxygen, free CO₂, pH, alkalinity). These quantifications were carried out along one year in five sampling stations between which río Chico arriba was significantly different due to high degree of material in suspension and high values for all of the descriptors measured, was different to the others. In the gravity-light axis the reservoir was stratified with upwelling of metalimnetic water inside the surface layer, and anoxic hipolimnio during the entire sampling year in all the sampling points. It is considered that the reservoir has an atelomictic mixture pattern.

Key words: Colombia, limnology, tropical reservoir, physical and chemical characterization

INTRODUCCIÓN

Los embalses se definen como puntos en la red hidrográfica donde el agua es retenida temporalmente formando una masa de agua relativamente profunda. Cuando los tiempos de retención son bajos se dice que los embalses se tornan similares a un río y que su calidad puede determinarse a partir de la calidad del agua entrante. Cuando dichos tiempos son altos, los embalses guardan mayor semejanza a un lago y desarrollan una clara organización vertical determinada por las entradas de luz y energía (Margalef 1983, Márquez y Guillot 2001, Ramírez y Roldán 2008); la calidad del agua

en este caso varía significativamente en dicho eje en función de las entradas o de la actividad biológica (Fischer et al. 1979). El agua de estos sistemas, debido a los varios usos a los que puede destinarse, es monitoreada continuamente con el fin de garantizar su calidad y minimizar el impacto ecológico ocasionado por los cambios biológicos, físicos y químicos que pueden producir represamiento de agua en un punto de una red lítica.

El embalse Riogrande II produce energía y agua para el consumo de los habitantes del área metropolitana del valle de Aburrá (Antioquia), Colombia y es uno de los 25

Recibido: agosto 2014; aceptado: febrero 2015.

¹ Grupo de investigación LimnoBasE y Biotamar, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. A. A. 1226. Medellín (Antioquia), Colombia.

² Universidad de Antioquia. A. A. 1226. Medellín (Antioquia), Colombia. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Correos electrónicos: ³ <altimetx@gmail.com>; ⁴ <johnra77@yahoo.com>; ⁵ <diazabel@epm.net.co>.

embalses más importantes del país (EPM 1989, Roldán y Ramírez 2008). Este sistema, debido a su carácter abierto, interacciona fuertemente con su cuenca y recibe de ella aportes continuos de nutrientes por parte de los vertidos de agua residual de los municipios de la zona de influencia (Salazar y Penagos 2005) o a partir del exceso de fertilizantes usados en la agricultura y la ganadería extensiva en zonas aledañas lejos de los cascos urbanos (EPM 1984). Las anteriores características sumadas a factores morfométricos (área, profundidad y volumen), altitud, tiempo de residencia media y condiciones climáticas permiten distinguir este cuerpo de agua de los demás de su clase.

Aunque se han realizado mediciones de la magnitud de algunas variables físicas y químicas en los afluentes (EPM 1984, 1989) y dentro del mismo embalse (Bustamante et al. 2012, Estrada 2007, Loaiza-Restano et al. 2011, Salazar y Penagos 2005), hasta la fecha, no se ha publicado una descripción ni una descripción ni un análisis detallado de estas variables, lo cual constituye el problema de la presente investigación. Lo anterior nos conduce a preguntar: **1)** ¿Entre estaciones de muestreo, cómo es la dinámica espacial-horizontal y la temporal de las variables climatológicas, físicas y químicas en el embalse? Se hipotetiza que si en ambas escalas la variabilidad es alta, entonces todos los descriptores físicos y químicos evaluados presentan en ellas coeficientes de variación altos

y diferencias estadísticamente significativas; y **2)** ¿cómo influyen las diferencias de profundidad y los aportes del entorno en dicha dinámica? La hipótesis establece que si las estaciones río Chico arriba y quebrada Las Ánimas tienen menor profundidad y mayor influencia de los afluentes, y si están sometidas a cargas alóctonas y autóctonas significativas, entonces en el eje gravedad-luz tienen un comportamiento similar entre sí en todos los tiempos, pero distinto al de las otras tres estaciones de muestreo.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio. El embalse Riogrande II se encuentra localizado en la parte central del departamento de Antioquia (Colombia), en la cuenca del río Grande, situada al norte de la ciudad de Medellín ($6^{\circ} 35' 57''$ y $6^{\circ} 28' 79''$ N; $75^{\circ} 32' 17''$ y $75^{\circ} 25' 85''$ O) (figura 1). Las temperaturas de la zona del embalse oscilan entre 14 y 18°C. Existen en ella dos períodos lluviosos, uno entre abril y junio y otro entre septiembre y noviembre, determinados principalmente por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical. Las épocas de lluvias bajas van de diciembre a marzo y de julio a agosto, siendo la primera menos intensa que la segunda. Los mayores valores de humedad se registran entre octubre y noviembre con promedios cercanos al 83%.

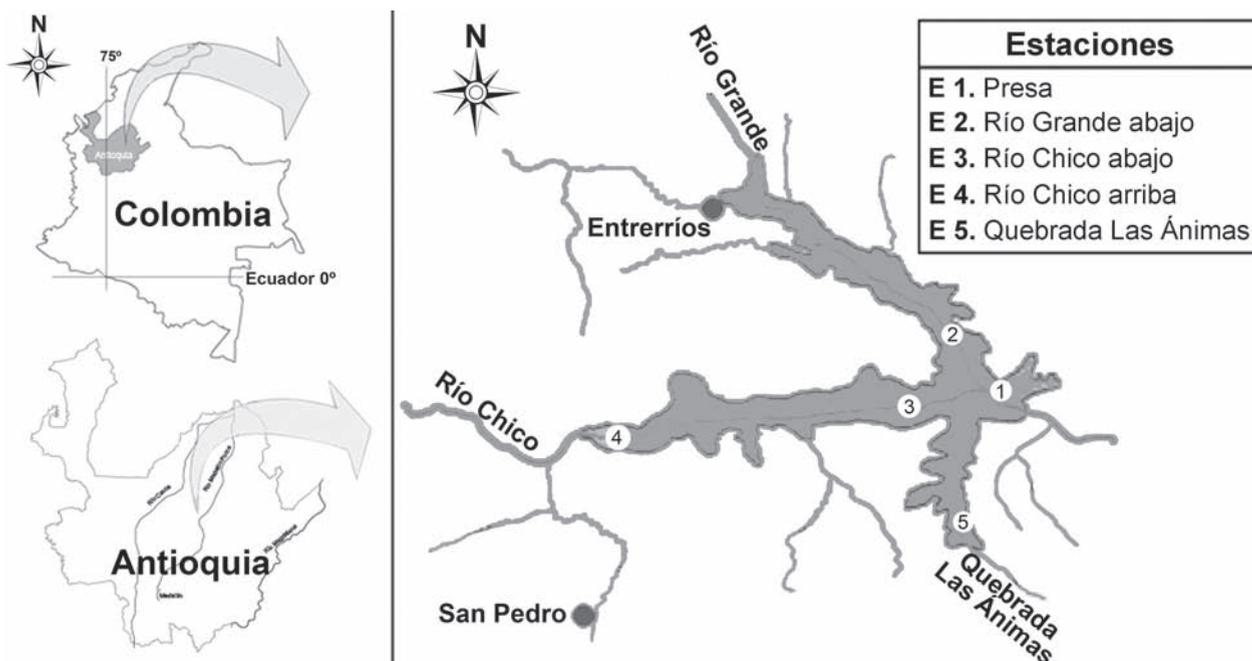


Figura 1. Ubicación geográfica y localización de las cinco estaciones de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia (1 = Presa; 2 = río Grande abajo; 3 = río Chico abajo; 4 = río Chico arriba; 5 = quebrada Las Ánimas)

La presa del embalse está ubicada a 1 km de la estructura en tierra y es la que presenta las mayores profundidades (35-40 m). Esta estructura crea el embalse que almacena 253 millones de m³ de agua e inunda 1.100 ha de los municipios de Belmira, Donmatías, Entrerriós, San Pedro de los Milagros y Santa Rosa de Osos. La torre de captación se localiza en un brazo del embalse que sube por la cuenca de la quebrada Las Ánimas (Franco-Velásquez et al. 2010). Las aguas del embalse, aunque altamente turbias, poseen buena calidad química (sólidos disueltos máximos de 18 mg/l). Son aguas muy blandas (5 mg CaCO₃/l), con altas concentraciones de hierro (Porras-Zapata et al. 1997). Su tiempo medio de retención de 72,8 días lo categoriza como un embalse de la clase B o embalse de retención intermedia (Straškraba 1999).

Franco-Velásquez (2011) determinaron que el caudal del río Grande es, en promedio, tres veces mayor al del río Chico; por ello, al entrar al cuerpo de agua el río Grande reparte su volumen entre el brazo del río Chico y el de la quebrada Las Ánimas y se interna en el río Chico hasta localizarse a 4 km de la cola del mismo, aumentando su tiempo de residencia. Por su parte, el río Chico ingresa al embalse como una corriente de fondo difícil de rastrear pues se mezcla rápidamente con el agua del embalse. El embalse permanece estratificado a lo largo del año. Esta estructura térmica está fuertemente asociada a la dinámica de la corriente de densidad de río Grande.

Para corroborar las hipótesis planteadas y cumplir los objetivos trazados, se ubicaron cinco estaciones de muestreo que comprenden la mayor cobertura del embalse y la influencia de los tres afluentes más importantes de este: río Grande, río Chico y quebrada Las Ánimas (figura 1).

Estación 1 (Presa). Se encuentra a 1 km de la estructura en tierra y presenta las mayores profundidades del embalse (35-40 m); representa la zona lacustre del embalse.

Estación 2 (río Grande abajo). Representa la zona transicional del embalse. Su profundidad varía entre 30 y 35 m. Este río recibe aportes de los municipios de Entrerriós y Santa Rosa de Osos.

Estaciones 3 (río Chico abajo) y 4 (río Chico arriba). Se localizan en el límite de entrada del río hacia su represamiento y en la parte alta del mismo. Presentan una profundidad promedio entre 25 y 30 m. El río Chico recibe aportes de los municipios de Belmira y San Pedro.

Estación 5 (quebrada Las Ánimas). Se halla a 1 km de la torre de captación en la entrada de la quebrada Las Ánimas

la cual es la que menor caudal aporta al embalse y la de menor profundidad (entre 12 y 15 m). Esta quebrada, situada al suroriente del embalse, recibe aportes de los municipios de Don Matías y Girardota.

Diseño muestral. Esta investigación utiliza una base de datos obtenida previamente entre los meses de agosto del 2002 y julio de 2003 en las cinco estaciones ya descritas en cada una de las cuales se realizaron tres muestreos por mes (a excepción de noviembre donde se efectuaron dos). Los descriptores muestreados, los instrumentos y los métodos de medida correspondientes se describen a continuación.

Variables climatológicas. Se consideraron pluviosidad (Sección de hidrometría de Empresas Públicas de Medellín), velocidad y dirección del viento (anemómetro y veleta de tela)

Variables físicas. Se midieron temperatura (termistor-oxímetro YSI), coeficiente de atenuación vertical de la irradiancia descendente (Datalogger Licor con sensor esférico), sólidos suspendidos totales (SS, análisis gravimétrico), sólidos disueltos (SD, análisis gravimétrico), turbidez (turbidímetro) y conductividad eléctrica (conductímetro WTW).

Para los perfiles de temperatura en cada estación de muestreo se llevaron a cabo inicialmente mediciones a cada 0,25 m en los primeros 10 m de profundidad; a partir de allí se realizaron a cada metro hasta el fondo.

Para establecer los valores de turbidez, SS, SD y conductividad eléctrica se extrajeron muestras de agua con una botella Schindler de 5 l a cada 5 m de las tres estaciones más profundas (Presa río Grande abajo, río Chico abajo) y a cada 2,5 m en las restantes (río Chico arriba y quebrada Las Ánimas). Los valores obtenidos en cada muestreo a estas profundidades se promediaron y a partir de ellos se construyeron las figuras correspondientes a estas variables.

Variables químicas. Fueron analizadas oxígeno disuelto (termistor-oxímetro YSI), pH (Peachímetro), alcalinidad (volumetría con H₂SO₄ 0,01N hasta pH de 4,32) y dióxido de carbono libre (Mackereth et al. 1978).

Los perfiles de oxígeno en cada estación de muestreo se efectuaron de la misma manera que los de temperatura. La extracción de las muestras de agua para alcalinidad, CO₂ y pH se llevó a cabo de la misma forma que para las variables físicas; no obstante, los valores de los descriptores temperatura, oxígeno disuelto, déficits reales de oxígeno

y CO₂, no se promediaron. De ellos se presentan sus respectivos perfiles en el eje gravedad-luz.

A partir de los valores de oxígeno, se computaron los déficits reales de oxígeno sustrayendo de la concentración teórica de oxígeno la concentración de oxígeno medida a una profundidad dada; resultados positivos de esta operación indican que no hay déficit de oxígeno, lo contrario, que sí lo hay. La concentración teórica de oxígeno se halló en una tabla que presenta la solubilidad del oxígeno en agua en equilibrio con el aire a una presión de 760 mm de Hg y 100% de humedad relativa (Roldán y Ramírez 2008).

Para determinar si en cada estación se formaba una capa diurna de mezcla, se calculó el número I (Spigel et. al. 1986, Imberger 1985a) que es la razón entre la tasa de energía potencial de la columna superior de agua y la tasa de trabajo del viento. La tasa de energía potencial se incrementa debido al calentamiento ejercido por la radiación electromagnética, y la tasa de trabajo del viento aumenta debido al estrés de viento. La capa diurna de mezcla es una región poco profunda localizada inmediatamente debajo de la superficie y, por tanto, fuertemente calentada por la radiación de onda corta, altamente mezclada por el estrés de viento presente y hundida durante el enfriamiento nocturno por fenómenos fundamentalmente convectivos en días calmos y por agitación con cortes de viento de hasta 1 o 2 m/s. Para establecer si había o no afloramiento del agua metalimnética se cuantificó el número de Wedderburn (**W**), el cual es un modelo que divide la columna de agua en dos capas de densidad diferente separadas por un metalimnio infinitesimalmente delgado. Relaciona el efecto de la resistencia flotante de las diferencias de densidad acumuladas debajo del termocline estacional, en relación a la fuerza desestabilizante del viento (Imberger 1985a). Si $W > 1$, el momento generado por el viento inclina la base de la capa mezclada profundizándola hacia el lado de sotavento, pero no es capaz de generar afloramiento de agua del metalimnio en el lado de barlovento. Cuando $W < 1$ el esfuerzo generado por el viento origina un momento que es capaz de vencer el momento estabilizador que genera la estratificación y la inclinación de la base de la capa de mezcla aumenta de tal manera que la parte superior de la termocline y, por ende, el agua del metalimnio aflora a la superficie en el extremo de barlovento del lago. Para el cálculo del valor de estos números se usó el programa Lake Calculador de Imberger (1985a).

La profundidad de la zona de mezcla se definió utilizando el criterio de Levitus (1982) el cual estipula que la profundidad de dicha zona llega hasta donde exista una

diferencia de 0,5 °C con respecto a la temperatura de la superficie.

Análisis estadístico. A todos los datos se les aplicó análisis descriptivo utilizando para ello estadísticos de tendencia central [media aritmética (**m**)] y dispersión absoluta y relativa [desviación estándar (**S**) y coeficiente de variación de Pearson (**Cv**, %)]. Para evaluar la significancia estadística de las diferencias entre estaciones y tiempos de muestreo para cada una de las variables estudiadas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías (estación y tiempo de muestreo) correspondiente a un diseño de bloques (en el que el tiempo fue asumido como variable de bloqueo) con interacción entre meses y estaciones. Para ello, los muestreos efectuados cada mes se asumieron como réplicas. Para alcalinidad, conductividad, pH y turbidez, las profundidades no fueron tomadas en cuenta directamente dentro del análisis como un factor de bloqueo debido a que la profundidad de la columna de agua en todas las estaciones varió entre muestreos; por tanto, se integraron los datos de la columna para cada una de las variables de tal forma que el ANOVA muestra la variación media de los valores de cada uno de los descriptores entre estaciones. Los programas usados para realizar los análisis estadísticos fueron STATISTICA 5,0 y STATGRAPHICS plus 5,1. A cada grupo de datos se le realizó una prueba de esfericidad con el fin de establecer su grado de normalidad. En el caso de existir esfericidad ($\alpha < 0,05$) se realizó un análisis univariado; en caso contrario ($\alpha > 0,05$) se efectuó un multivariado. Para efectos de obtener mayor rigurosidad en la significancia estadística cuando se llevó a cabo el análisis univariado se hizo una corrección adicional a los datos, la de Huynh Feldt, y para el caso del multivariado se realizó la de Pillai-Bartlett Trace. En los casos en los que existieron diferencias significativas se realizaron comparaciones múltiples (**CM**). Para el caso de la alcalinidad, la conductividad eléctrica, el pH, los sólidos y la turbidez, las CM se aplicaron usando la prueba de Newman-Keuls; en los demás se usó la prueba *Least Square Difference* (**LSD**).

RESULTADOS

Variación climática. Pluviosidad. El régimen de pluviosidad (figura 2) varió mucho en el año de muestreo ($Cv = 184,3\%$). Se caracterizó por un largo periodo de sequía (finales de diciembre, todo enero y comienzos de febrero) y dos marcados de invierno (con picos en octubre y junio) (figura 2) para una precipitación anual total de 1.324,20 mm. No obstante dentro de estos grandes

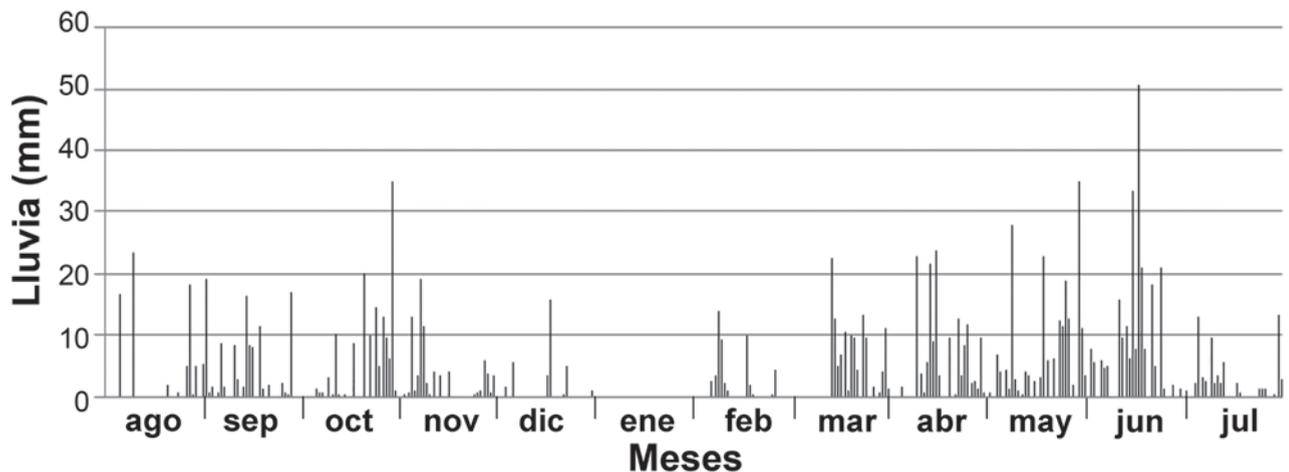


Figura 2. Valores de la pluviosidad diaria total para el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. Es de notar que entre los picos de las temporadas de lluvia se presentaron días en los que la pluviosidad fue baja o nula. La temporada de lluvias de febrero a julio fue más intensa que la de agosto a diciembre

lapsos se presentaron variaciones diarias en la pluviosidad que fluctuaron en frecuencia y magnitud debido a que de los 1.324,20 mm de lluvia el 35% corresponde a la primera temporada, mientras que la segunda temporada cuenta con el 65% de la precipitación total. Además de los 215 días en los que se dieron lluvias el 40% se ubicó en la primera temporada y el resto en la segunda.

Velocidad y dirección del viento. Para todas las estaciones, la velocidad del viento fue en promedio poco variable en el tiempo ($C_v = 24,0\%$); las estaciones río Chico arriba y quebrada Las Ánimas presentaron la menor variabilidad ($C_v = 20,0\%$). Los meses en los cuales se presentaron las velocidades más bajas fueron principios de agosto, mediados de septiembre, octubre y mayo. No obstante, no se evidenció tendencia alguna hacia el aumento o disminución de la magnitud de la velocidad en el tiempo para las estaciones río Grande abajo, río Chico abajo, río Chico arriba y quebrada Las Ánimas (figura 3). En general el viento mostró una velocidad cambiante a lo largo del año en todas las estaciones. La única estación que presentó alguna tendencia fue la Presa, en la cual, por medio de una regresión lineal se estableció que hay un aumento de la velocidad en el tiempo (pendiente $m = 0,09$; $R^2 = 0,58$) con respecto a las demás estaciones (pendiente $m < 0,000$). La dirección predominante para las estaciones Presa, río Grande abajo y río Chico abajo en la mayoría de los meses de muestreo fue noroeste (lo típico para el embalse según lo registrado por Empresas Públicas de Medellín) a excepción de la estación río Chico arriba donde la dirección predominante fue suroeste y la estación quebrada Las Ánimas en la que las trayectorias del viento fueron erráticas a lo largo del

año y no mostraron una tendencia definida (figura 3). Las direcciones del viento no corresponden a cabalidad con la dirección del *fetch* efectivo para las estaciones del embalse ya que éste se encuentra en la dirección oeste-este (en el eje de la entrada del principal afluente, el río Grande) determinando que la fuerza del viento tiene mayor importancia para la estación río Chico arriba; por ello, esta estación presentó la dirección más cercana al *fetch* efectivo.

Variación en las escalas espacial-horizontal y temporal.

Alcalinidad. Los valores oscilaron entre 13 y 18 mg CaCO_3/l para todas las estaciones a lo largo del año de muestreo; estos valores se consideran muy bajos. Se dieron diferencias significativas entre estaciones ($\alpha < 0,001$) y meses ($\alpha < 0,001$). Las comparaciones múltiples para las estaciones formaron dos grupos: el primero constituido por la estación río Chico arriba (en la cual se alcanzaron los valores más altos en todos los meses), el segundo por las demás estaciones. Las CM entre meses establecieron cuatro grupos (figura 4A).

Turbidez. Presentó diferencias significativas entre estaciones ($\alpha < 0,001$) y meses ($\alpha < 0,001$); la diferencia la marcó la interacción ($\alpha < 0,001$) entre las estaciones río Grande abajo y río Chico arriba que formaron un grupo en el que la turbidez fluctuó en los meses de febrero y abril con tendencias opuestas; las otras estaciones formaron otro grupo. Las CM entre meses para dicho descriptor formaron tres grupos (figura 4B). Según la escala de Bruton (1985) las aguas de las estaciones río Grande abajo y río Chico arriba se consideran turbias (entre 50 y 80 NTU); las demás son semiturbias todo el año (entre 10 y 50 NTU).

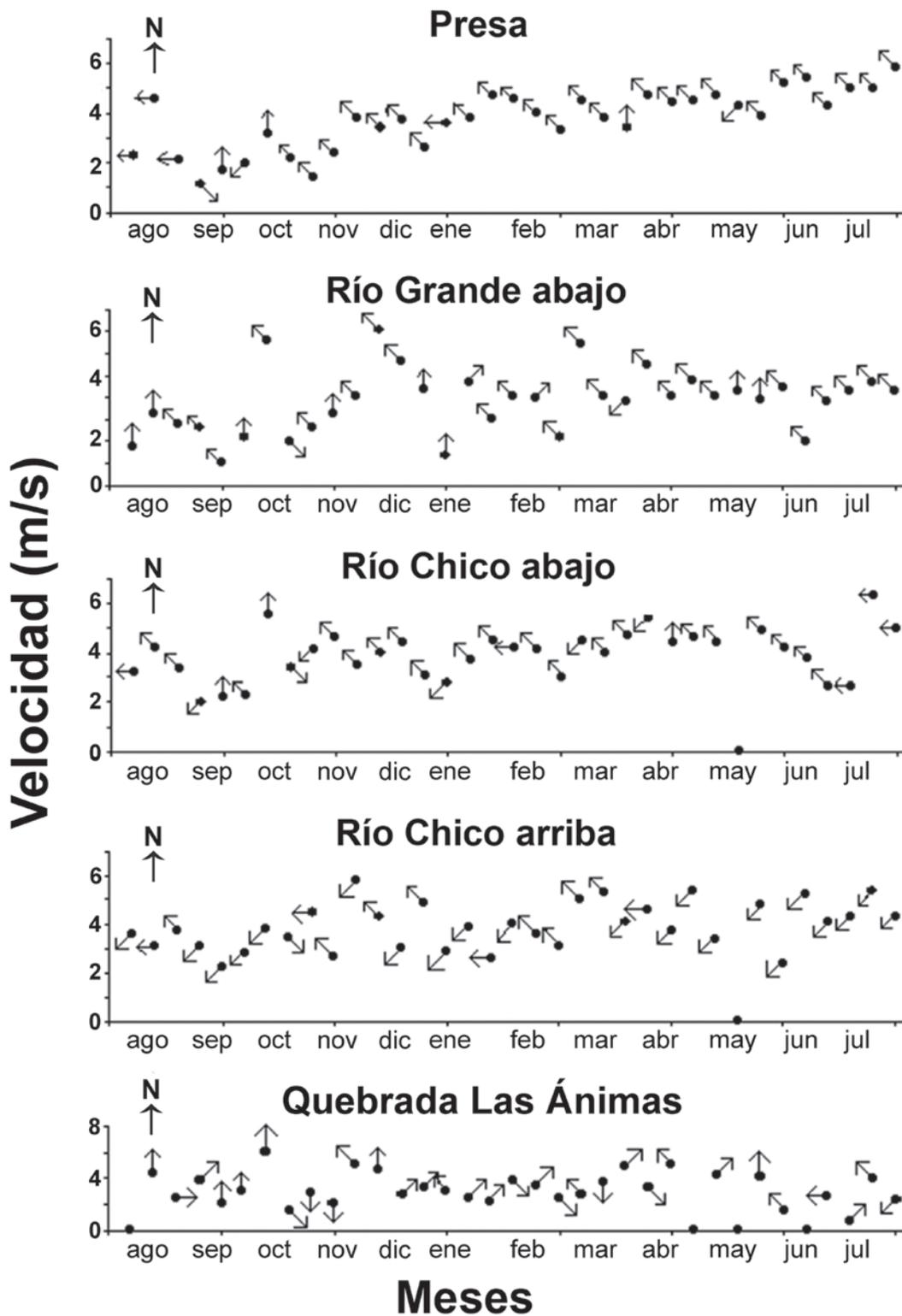


Figura 3. Cambios en la velocidad y en la dirección del viento en las cinco estaciones de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. Las flechas indican la dirección del viento y los puntos negros su velocidad

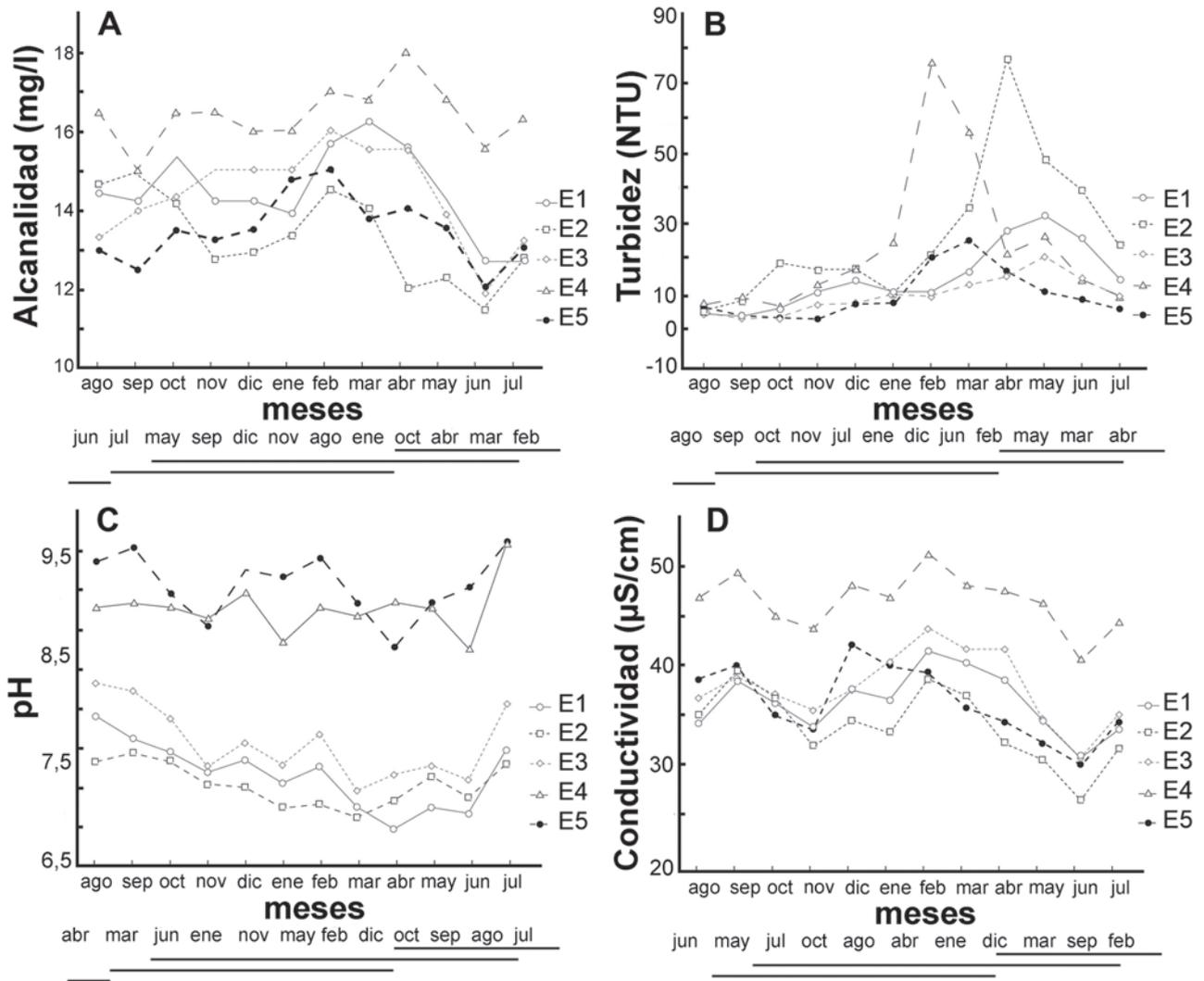


Figura 4. Variación temporal de A. Alcalinidad (mg CaCO₃/l); B. Turbidez (NTU); C. pH; D. Conductividad eléctrica (µS/cm) en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. Las comparaciones múltiples (CM) para los meses se observan en la parte inferior de la figura (Estaciones: E 1 = Presa, E 2 = río Grande abajo, E 3 = río Chico abajo, E 4 = río Chico arriba, E 5 = quebrada Las Ánimas)

pH. Exhibió diferencias significativas entre meses ($\alpha < 0,001$) y estaciones ($\alpha < 0,001$) tendiendo hacia la basicidad en todas las estaciones con valores entre 6,90 y 9,75. Las CM para esta variable determinaron dos grupos: las estaciones quebrada Las Ánimas y río Chico arriba formaron uno de ellos mostrando interacción ($\alpha < 0,001$) entre ellas; y las estaciones Presa, río Grande abajo y río Chico abajo constituyeron el otro. Las CM entre meses mostraron cinco grupos (figura 4C).

Conductividad. Varió significativamente entre estaciones ($\alpha < 0,001$) y meses ($\alpha < 0,001$) con valores que oscilaron entre 26 y 52 µS/cm para todo el año. Las CM conformaron

dos grupos conformados por la estación río Chico arriba, que tiene los valores más altos, y las demás estaciones que mostraron los más bajos valores. Las CM entre meses formaron cinco grupos (figura 4D).

Sólidos. Los SS variaron significativamente entre estaciones ($\alpha < 0,001$) y meses ($\alpha < 0,001$) mostrando una interacción débil ($\alpha = 0,023$) la cual se evidenció en el grupo que integraron las estaciones 4 y 5 en los meses de febrero, marzo, abril y mayo; las estaciones 1, 2 y 3 formaron el otro grupo. Las CM para meses constituyeron dos grupos (figura 5A). Los SD sólo exhibieron diferencias significativas entre

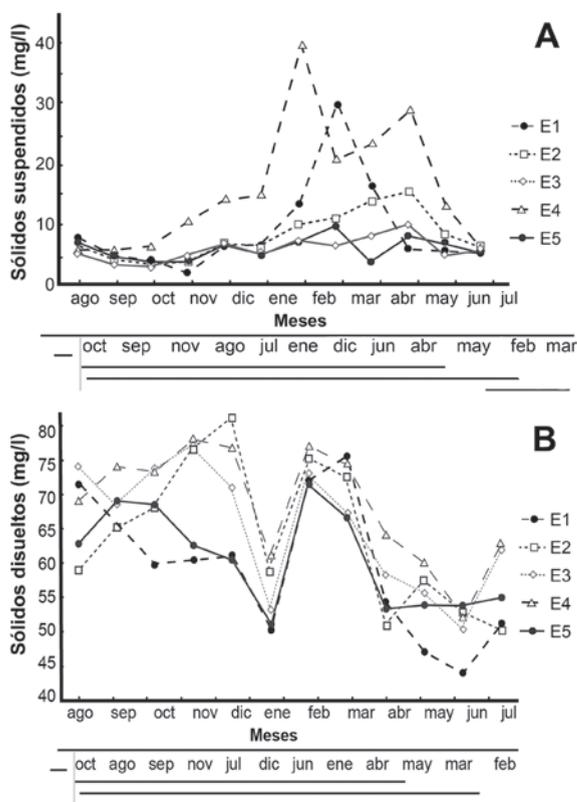


Figura 5. Devenir temporal de la concentración de A. Sólidos suspendidos y B. Sólidos disueltos en la zona fótica de las cinco estaciones de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia (Estaciones: E 1 = Presa, E 2 = río Grande abajo, E 3 = río Chico abajo, E 4 = río Chico arriba, E 5 = quebrada Las Ánimas)

meses ($\alpha = 0,003$) marcadas por tres grupos de meses donde enero y junio alcanzaron los valores más bajos, julio los intermedios y el resto de meses los más altos (figura 5B).

Atenuación vertical de la irradiancia descendente. Para los coeficientes de atenuación vertical para irradiancia descendente ($K_{d(PAR)}$) se hallaron diferencias significativas entre estaciones ($\alpha < 0,001$) y meses ($\alpha < 0,001$). Dichas diferencias se debieron a que en la estación río Chico arriba se atenuó mayor cantidad de luz que en las demás estaciones en los meses de febrero, marzo, abril y mayo; esto se puede observar con más detalle en las CM para estaciones y meses (figura 6).

Variación vertical. Dinámica de la capa mezclada. El valor promedio más alto de la profundidad de la capa de mezcla se presentó todo el año en la estación Presa, y el más bajo en la quebrada Las Ánimas; todas las estaciones mostraron altos coeficientes de variación (tabla 1). La profundidad de mezcla disminuyó en la temporada seca

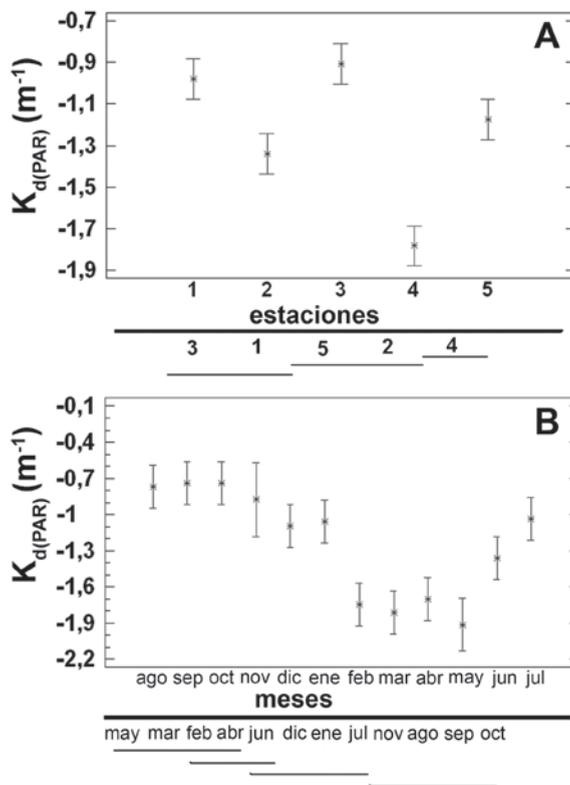


Figura 6. Embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. A. Desarrollo espacial-horizontal del coeficiente de atenuación vertical para irradiancia descendente ($K_{d(PAR)}$). B. Evolución temporal de la misma variable. (Estaciones: E 1 = Presa, E 2 = río Grande abajo, E 3 = río Chico abajo, E 4 = río Chico arriba, E 5 = quebrada Las Ánimas)

en las estaciones Presa y río Grande abajo; en las demás estaciones no hubo una coincidencia cercana con la variación de la pluviosidad (figura 7). Los datos calculados para los números I y W mostraron que ambos tuvieron siempre valores por debajo de sus valores crítico ($I < 0,2$ y $W = 1$), tal y como se puede observar en la figura 8.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos para la variación temporal de la profundidad de mezcla para cada una de las cinco estaciones de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia (S = desviación estándar; Cv = coeficiente de variación de Pearson en %)

Estadísticos	Media	S	Cv (%)
Presa	4,92	2,80	57,00
Río Grande abajo	2,19	1,68	76,81
Río Chico abajo	2,90	1,73	59,85
Río Chico arriba	2,21	1,37	62,03
Quebrada Las Ánimas	1,05	0,79	75,54

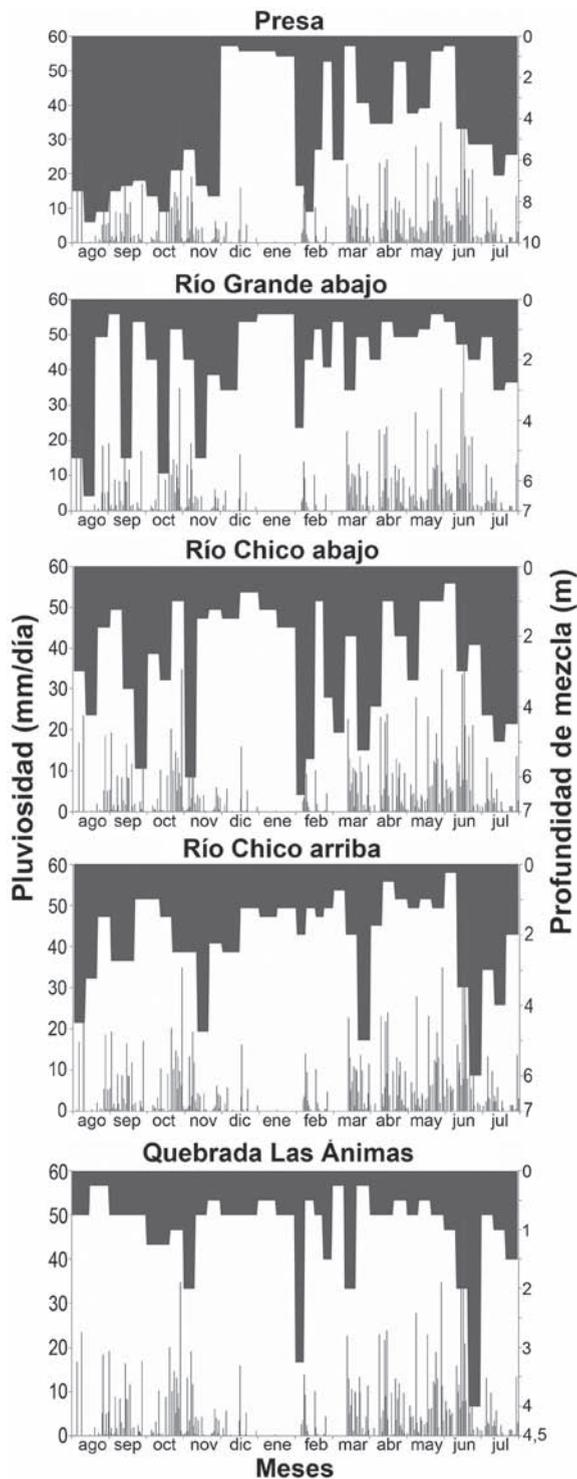


Figura 7. Variación temporal de la profundidad de la capa mezclada en las cinco estaciones de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. La zona oscura designa la profundidad que alcanzó la zona de mezcla y las líneas verticales grises claras corresponden a la pluviosidad

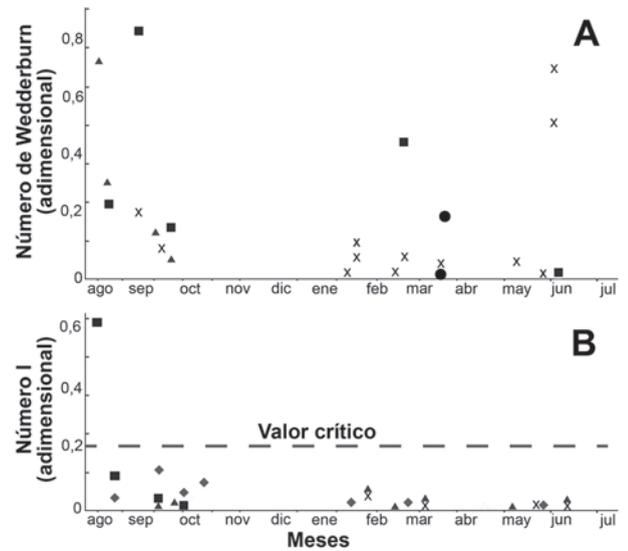


Figura 8. Embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. A. Evolución temporal del número W [Estaciones: ■ = Presa, ▲ = río Grande abajo, X = río Chico abajo; * = río Chico arriba, ● = quebrada Las Ánimas]. B. Evolución temporal del número I [Estaciones: ◆ = Presa, ■ = río Grande abajo, ▲ = río Chico abajo; X = río Chico arriba, * = quebrada Las Ánimas]. El valor crítico para W es 1; valores por debajo de éste indican que el metalimnio se mezcla con el epilimnio. En el caso de I el valor crítico es 0,2; valores inferiores a este límite indican que no hay una termoclina diurna real

Déficit real de oxígeno. Los valores de oxígeno tuvieron en promedio coeficientes de variación muy altos ($Cv = 128,3\%$) en el eje gravedad luz en todos los meses de muestreo en todas las estaciones. Excepto en la estación Chico arriba (que en los primeros metros de profundidad no presentó déficit), en todas las demás estaciones un notable déficit de oxígeno (figura 9). El patrón obtenido muestra que hay un punto en la columna de agua donde el déficit aumentó abruptamente contrastando la superficie con el fondo.

Co₂ libre. Presentó altos coeficientes de variación ($Cv = 52,7\%$) en el eje gravedad luz a lo largo de todo el año en todas las estaciones de muestreo; sus concentraciones más altas se presentaron en la zona hipolimnética de las estaciones Presa, río Grande abajo y río Chico abajo, y las concentraciones más bajas en el hipolimnio de las estaciones quebrada Las Ánimas y río Chico arriba (figura 10).

DISCUSIÓN

Variación espacial horizontal. La alcalinidad y la conductividad eléctrica (figuras 4A y 4D) variaron de forma

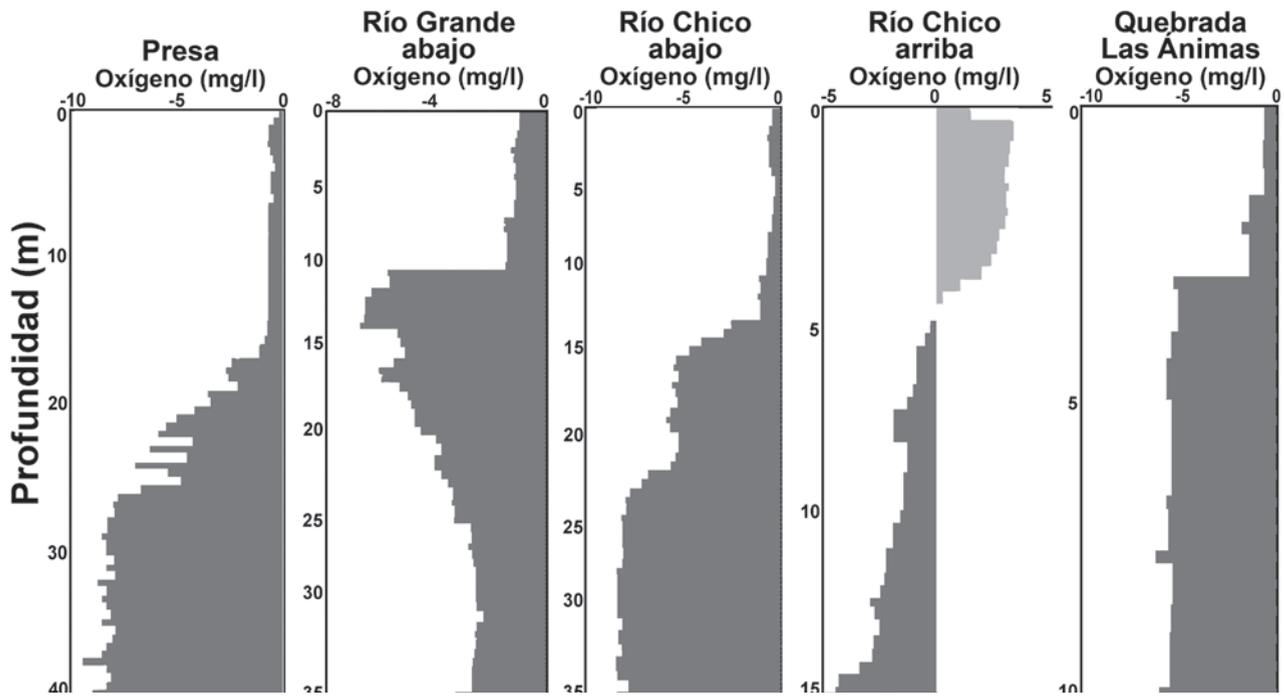


Figura 9. Perfiles de los déficits reales de oxígeno para cada estación de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. En todas las estaciones se evidenció el mismo patrón el cual se repitió durante todo el año. (el área oscura indica la región con déficits de oxígeno)

similar alcanzando los valores más altos en la estación río Chico arriba debido a que este sitio se encuentra en la entrada de un afluente cuya cuenca recibe gran cantidad de materiales de desecho producto de las actividades agropecuarias e industriales que se desarrollan en el casco urbano y en las áreas aledañas a la cuenca del río Chico. No obstante, dado que las entradas de los tributarios suelen tener cargas abundantes de materiales provenientes de la cuenca que incrementan la cantidad de sólidos disueltos y en suspensión, se esperaría que la estación quebrada Las Ánimas también tuviese alcalinidades y conductividad igualmente altas (Esteves 2011, Tundisi y Tundisi 2008) lo cual no sucedió. Esto confirma lo dicho con respecto a la contaminación antrópica ya que la quebrada Las Ánimas es un afluente de primer orden que al no tener ningún tributario recibe menor cantidad de aportes que el río Chico, el cual es un afluente de tercer orden. Los meses en los que se obtuvieron los valores más bajos de conductividad y alcalinidad fueron noviembre, junio y julio lo que se debió a que los picos más bajos de pluviosidad se dieron en estos meses por lo que disminuye la cantidad de aportes de los materiales causantes, en parte, de la conducción de iones en el agua y del efecto tamponador. Algo similar sucedió en el embalse de Sau en donde Armengol et al. (1999) hallaron resultados similares, atribuyendo dichas

variaciones espaciales a la entrada de un afluente (El Ter) el cual incrementaba los valores de conductividad y alcalinidad por la entrada de materiales producto de la escorrentía, pero principalmente de la contaminación antrópica. Los cambios temporales de estas dos variables en Sau se atribuyeron a las variaciones en la pluviosidad y en la velocidad del viento, los cuales inducían los periodos de estratificación y mezcla. Para el caso de Riogrande II consideramos que solamente los cambios en la pluviosidad fueron los que mejor explicaron las variaciones en la conductividad y la alcalinidad.

Para el caso de la turbidez (figura 4B) sólo se observaron diferencias marcadas en las estaciones río Grande abajo y río Chico arriba en los meses de febrero y abril respectivamente en los que se alcanzaron valores muy altos con respecto a las demás estaciones. En ambas estaciones tales picos se debieron a la descarga de sólidos suspendidos provenientes del río Chico y del río Grande. La estación río Grande abajo se vio fuertemente afectada a comienzos de la segunda temporada lluviosa (la más fuerte) debido a que a pesar de estar tan alejada de la entrada del afluente alcanzaba a ser influenciada por él. Como se mencionó, el río Grande, con un caudal aproximadamente tres veces mayor que el del río Chico, es el cauce principal que

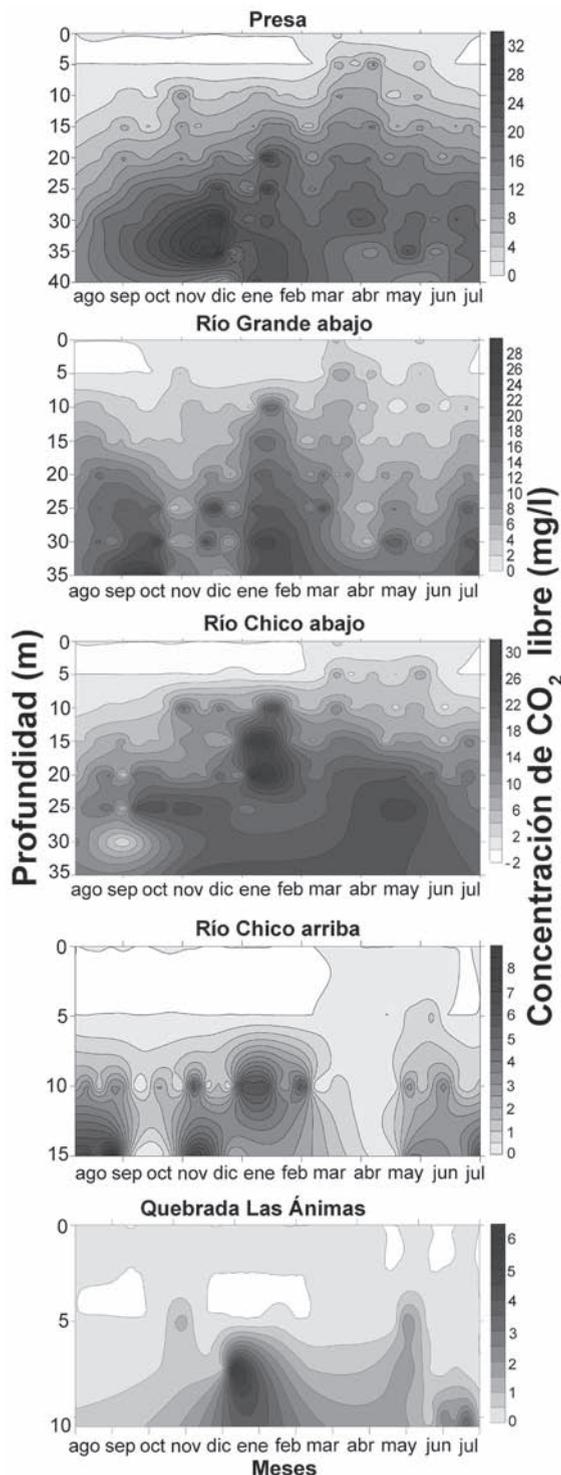


Figura 10. Isolínea de concentración CO₂ libre en las cinco estaciones de muestreo en el embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. (las concentraciones más altas se representan con color oscuro y las menores con colores más claros)

alimenta el embalse y, por tanto, es el que recibe mayor cantidad de materiales alóctonos en comparación al río Chico y la quebrada las Ánimas. Por otro lado, la causa por la que se presentó primero el pico de turbidez en la estación río Chico arriba y luego en río Grande abajo fue la variación en la intensidad de las lluvias ya que las precipitaciones que empezaron a mediados de febrero fueron débiles y aumentaron gradualmente a tal punto que su influencia afectó la turbidez en la estación río Chico abajo en abril, pero no a la estación río Chico arriba puesto que ya se habían arrastrado gran cantidad de materiales al principio de las lluvias. Los hallazgos de Armengol et al. (1999), Esteves (2011), Ramírez y Machado (1982), Tundisi y Tundisi (2008), Uribe y Roldán (1975) y Vargas y Ramírez (2002) concuerdan con los resultados hallados en la medida en que la variación de la pluviosidad y la cercanía de los puntos de muestreo con los afluentes determinan la turbidez del agua.

El pH (figura 4C) mostró valores altos todo el año de muestreo para las estaciones río Chico arriba y quebrada Las Ánimas debido a que éstas fueron las que presentaron las más bajas profundidades por lo que la luz penetraba hasta el fondo, lo que aumentó la producción fitoplanctónica en toda la columna de agua e incrementó el consumo de CO₂ cuya consecuencia es el aumento del pH. Además, es menester considerar que la disminución fotosintética de CO₂ puede aumentar el pH hasta el punto en que el CO₃⁻² sea precipitado como sales de calcio (Margalef 1983, Wetzel 2001).

Con respecto a los sólidos (figura 5), el patrón encontrado en todas las estaciones muestra que los sólidos suspendidos fueron menores que los disueltos y que las variaciones temporales de los sólidos suspendidos coincidieron más con las variaciones de la pluviosidad que las de los sólidos disueltos. Estos últimos, se comportaron en forma inversa a la pluviosidad, siendo mayores en la primera temporada (lluvias bajas), reduciéndose drásticamente hacia enero (cuando no hubo lluvias) y disminuyendo a medida que la pluviosidad se incrementaba en la segunda temporada de lluvias debido al incremento del volumen de agua entrante proveniente de los ríos Chico y Grande.

Dinámica de la capa mezclada y del epilimnio. La pluviosidad (figura 2) jugó un papel muy importante en la profundización de la capa de mezcla como lo registran varios autores en otros cuerpos de agua (Imberger 1985b, Lewis 1987, Margalef 1983) ya que en la época de sequía dicha capa mantuvo baja profundidad en las estaciones Presa y río Grande abajo independientemente de las

variaciones en la velocidad del viento. Sin embargo, independientemente de que los vientos o la precipitación afecten la profundidad de dicha capa, ésta siempre fue baja en comparación con la profundidad total en cada estación de muestreo, y nunca desapareció, por lo que las fuerzas resistentes a la mezcla fueron superiores a la energía mecánica introducida por el viento o las corrientes convectivas tal y como sucedió en el embalse La Fe (Ramírez et al. 2013, Román-Botero et al. 2013).

Imberger (1994), Margalef (1983), Monismith et al. (1990) y Reynolds (1992) consideraron que la estructura de la columna de agua es impartida mediante la separación de capas de agua verticalmente diferenciadas de acuerdo a sus densidades individuales. Se considera generalmente que la variabilidad en esa estructura es ocasionada por la relación entre el flujo neto de calor en los primeros metros de la columna de agua y el trabajo del viento que introduce un flujo de energía cinética; si esta última es mayor, la mezcla avanzará verticalmente y destruirá la estructura generada por la estratificación. En los cuerpos de agua tropicales, los patrones de viento y precipitación juegan papel muy importante como modeladores de la estratificación y de la mezcla (Imberger 1985a, Lewis 1987, Margalef 1983); sin embargo, no puede ignorarse el papel de los afluentes en dicho modelado como lo plantean Román-Botero et al. (2013) para el embalse La Fe.

El Embalse Riogrande II recibió para el año de muestreo vientos con la suficiente velocidad ($> 3,5$ m/s según Margalef 1983, Patterson et al. 1984, Reynolds 1992, 1994) como para afectar la estabilidad de la columna en todas las estaciones. A esto se suma que tuvieron una dirección relativamente constante (noroeste en las estaciones Presa, río Grande abajo y río Chico abajo, sur-oeste en río Chico arriba, y quebrada Las Ánimas sin dirección constante) (figura 3) lo que aumentó la frecuencia de choque entre la masa de aire y la de agua (Roldán y Ramírez 2008, Wetzel 2001). No obstante, la dirección del viento no coincidió por completo con el *fetch* efectivo con el cual el viento hubiera podido ejercer mayor influencia en cada una de las estaciones, a excepción de la estación río Chico arriba en donde la dirección del viento (noreste-suroeste) coincidió con la orientación del eje del río. Por la entrada del río Chico y la poca profundidad de la misma, en la estación río Chico arriba se alcanzaron las mayores alturas de la capa de mezcla en relación con la profundidad total.

Debido al prolongado aislamiento de las capas inferiores, el cuerpo de agua presentó un hipolimnio anóxico y bastante extenso (aproximadamente entre el 80 y 98% de la columna

de agua de 25 m en la presa) todo el tiempo del muestreo y en todas las estaciones (figura 9), lo que podría llevar a la conclusión equivocada de que el papel de los afluentes en Riogrande II no es tan importante en la re-aireación del embalse ni en la mezcla del mismo.

Dado que el embalse Riogrande II es un cuerpo de agua en el que el epilimnio permanece en constante mezcla todo el año puede entonces clasificarse como un cuerpo de agua con un patrón de mezcla atelomítico según lo propuesto por Barbosa y Padisak (2002) y Lewis (1983). Dicho patrón se produce debido a que la mezcla es causada únicamente por la convección superficial producida por los cambios en el régimen de pluviosidad. Por ello, lo obtenido con los números I y W (figura 8) muestra que: **1)** por encima de la termoclina todo se está mezclando; **2)** el agua de la porción superior de la termoclina afloró a barlovento; y **3)** el hipolimnio permaneció casi “íntacto” y con pronunciados déficits reales de oxígeno que se presentaron a lo largo de todo el año de muestreo. Sumado al déficit real de oxígeno en el hipolimnio (figura 9) hubo altas concentraciones de CO_2 , (figura 10) disminuciones de pH e incrementos de conductividad (Esteves 2011, Tundisi y Tundisi 2008), cuyo devenir temporal está influenciado por la profundidad a la que penetren los afluentes principales del embalse. Este comportamiento fue similar para todas las estaciones. La presencia de estos gradientes corrobora la existencia de una termoclina que ejerce resistencia a la mezcla profunda.

Según Esteves (2011) y Ruttner (1952), el déficit de oxígeno algo común en la zona tropical debido a las altas temperaturas de fondo (Margalef 1983, Wetzel 2001) Σ , es una variable que indica la existencia de estratificación continua de la columna de agua. En el embalse Riogrande II se presentan discontinuidades marcada en todas las estaciones de muestreo y en todo el año de muestreo, que coinciden con los gradientes térmico y de densidad; en este sitio las concentraciones de oxígeno pasan de tener un valor relativamente constante a valores cercanos a cero.

CONCLUSIONES

La hipótesis formulada a la primera pregunta fue aceptada pues la variabilidad tanto espacial como temporal fue pronunciada para la mayoría de las variables medidas, por lo que los coeficientes de variación fueron altos y se hallaron diferencias estadísticamente significativas tanto entre estaciones de muestreo como entre meses de colecta para todos los descriptores físicos y químicos

evaluados. Igualmente, la previsión efectuada en la segunda hipótesis respecto a que las estaciones cercanas a los afluentes (río Chico arriba y quebrada Las Ánimas) tenían comportamiento similar entre sí y muy distinto al de las demás, fue aceptada ya que el embalse es heterogéneo en el eje horizontal con respecto a sus variables físicas y químicas y dicha variación es marcada por la entrada del río Chico cuyas aguas altamente contaminadas hacen que esa parte del embalse exhiba características muy diferentes del resto. En consecuencia, los aportes del entorno influyen grandemente en la dinámica de las variables físicas y químicas tanto en el espacio como en el tiempo.

Con respecto a la hipótesis planteada para la variación vertical se rechaza que las estaciones con menor profundidad (río Chico arriba y quebrada Las Ánimas) se mezclan en el eje gravedad luz, lo que indica que, independientemente de la profundidad o el punto de ubicación (zona lítica o limnética), en el eje gravedad-luz todo el embalse tiende a mezclarse parcialmente sólo en el epilimnio pues la alta densidad de las aguas hipolimnéticas impide el progreso de la mezcla vertical debida al viento y la convección. Pese a ello, la influencia de los afluentes y la profundidad a la que discurren en el interior del embalse puede disminuir o acrecentar dicho progreso y aportar material que puede acentuar el déficit hipolimnético de oxígeno, los aumentos de CO₂ y conductividad eléctrica, y las disminuciones de pH a esta profundidad.

La variación espacial horizontal del pH como la de los demás descriptores usados fue afectada principalmente por la acción de los organismos en superficie y por los aportes alóctonos y autóctonos provenientes de la entrada de los afluentes, los cuales sin importar las variaciones ambientales siempre fueron mayores en la estación río Chico arriba. La variación temporal se relacionó con los cambios en la pluviosidad, los cuales a su vez influyen el aporte de los afluentes y la profundidad a la cual penetran al embalse.

La profundidad de mezcla fue afectada especialmente por las lluvias, los afluentes y las corrientes convectivas, y en menor grado por la energía mecánica asociada al viento; no obstante, independientemente de esta influencia, su profundidad fue siempre baja en comparación con la profundidad total en todas las estaciones de muestreo. En consecuencia, y como lo corroboran los valores de los números I (< 0,2) y W (< 1), mientras el epilimnio permaneció mezclado con afloramiento de agua metalimnética, el hipolimnio permaneció todo el año de muestreo con déficits pronunciados de oxígeno,

altas concentraciones de dióxido de carbono, pH bajo y conductividad alta. Estas características identifican al embalse Riogrande II como un cuerpo de agua que sólo se mezcla superficialmente bajo el influjo del viento con un patrón de mezcla incompleto (atelmixis).

REFERENCIAS

- Armengol J, Comerma M, Garcia JC, Romero M, Rodrigues JJ, Valero F, Vidal A. 1999. Contribució al coneixment del' ecología acuática del' embassament de Sau. Evolució del' embassament al 1999. Barcelona (España): Universidad de Barcelona, Departament d' Ecología. p. 120.
- Barbosa FAR, Pádisak J. 2002. The forgotten lake stratification pattern: atelmixis and its ecological importance. Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 28: 1385-1395.
- Bruton MN. 1985. The effects of suspensoids on fish. Hydrobiologia, 125: 21-241.
- Bustamante C, Ramírez-R JJ, Boltovskoy A, Vallejo A. 2012. Spatial and temporal change characterization of *Ceratium furcoides* (Dinophyta) in the equatorial reservoir Riogrande II, Colombia. Acta Limnologica Brasiliensis, 24 (2): 207-219.
- EPM (Empresas Públicas de Medellín). 1984. Proyecto de aprovechamiento múltiple del Riogrande. Revista Empresas Públicas de Medellín, 6 (1-2): 172.
- EPM (Empresas Públicas de Medellín). 1989. Evolución del desarrollo hidroeléctrico en el departamento de Antioquia. Revista Empresas Públicas de Medellín, 11 (3-4): 79-81.
- Esteves FA. 2011. Fundamentos de Limnología. Tercera edición. Rio de Janeiro (Brasil): Editora Interciência. p. 790.
- Estrada AL. 2007. 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 de doctorado]. [Medellín (Colombia): Universidad de Antioquia. p. 125.
- Fischer HB, List EJ, Koh RC, Imberger J, Brooks NH. 1979. Mixing in inland waters and coastal waters. New York: Academic Press. p. 483.
- Franco-Velásquez JD, Toro Botero FM, Gómez-Giraldo A. 2010. Efecto de la posición de la compuerta de captación sobre la estructura térmica de un embalse tropical. En: XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 21-25 de noviembre de 2010. Punta del Este, Uruguay. Fecha de acceso: 16 de febrero de 2015. Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/view/year/2010.type.html#sthash.E2aC8ezk.dpuf>>.
- Franco-Velásquez JD. 2011. Modelación de la estructura térmica de un embalse ramificado mediante el análisis de los procesos físicos gobernantes. Aplicación al embalse multipropósito Riogrande II [Disertación de Maestría]. [Medellín (Colombia)]: Universidad Nacional de Colombia. p. 84.
- Imberger J. 1985a. Thermal characteristics of standing waters: an illustration of dynamic of processes. Hydrobiologia, 125: 7-29.

- Imberger J. 1985b. The diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*, 30: 737-770.
- Imberger J. 1994. Transport process in lakes: a review. En: Margalef R, editor. *Limnology now: a paradigm of planetary problems*. New York: Elsevier Science. p. 99-194.
- Levitus S. 1982. *Climatological Atlas of the World Ocean*, NOAA Professional Paper N.º 13. Rockville (M. D., U. S. A.): U.S. Gov. Printing Office. p. 190.
- Lewis WM. 1983. Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *Limnology and Oceanography*, 28: 273-286.
- Lewis WM. 1987. Tropical limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18: 159-184.
- Loaiza-Restano AM, Ramírez Restrepo JJ, Echenique RO, Vallejo A, Ortíz MLM. 2011. Dinámica espacio-temporal de cuatro especies de *Staurastrum* (Meyen 1829, emend. Ralfs 1848) en un embalse eutrófico colombiano. *Oecologia Australis*, 15 (3): 726-746.
- Mackereth FJH, Heron J, Talling JF. 1978. *Water analysis: some revised methods for limnologist*. Windermere (Florida, U. S. A.): Freshwater Biological Association. Scientific Publication N.º 36. p. 114.
- Margalef R. 1983. *Limnología*. Barcelona (España): Editorial Omega. p. 1010.
- Márquez G, Guillot G. 2001. *Ecología y efecto ambiental de embalses, aproximación con caso colombianos*. Medellín (Colombia): Universidad Nacional de Colombia. p. 211.
- Monismith SG, Imberger J, Morison ML. 1990. Convective motions in the sidearm of a small reservoir. *Limnology and Oceanography*, 35: 1676-1702.
- Patterson JC, Hamblin PF, Imberger J. 1984. Classification and dynamic simulation of the vertical density structure of lakes. *Limnology and Oceanography*, 29: 845-861.
- Porras-Zapata P, Betancourt-Ángel A, Molina-Arredondo AM, Lopera-Pérez JD, Agudelo-García RA. 1997. El recurso agua como elemento ordenador del territorio: zona de influencia del embalse Riogrande II [Disertación de maestría]. [Medellín (Colombia)]: Universidad Nacional de Colombia. p. 102.
- Ramírez JJ, Machado J. 1982. Influencia de la precipitación y los ortofosfatos en el fitoplancton de la represa de la Fe. *Actualidades Biológicas*, 11 (39): 3-21.
- Reynolds CS. 1992. Dynamics, selection and composition of phytoplankton in relation to vertical structure in lakes. *Ergebnisse der Limnologie*, 35: 13-31.
- Reynolds CS. 1994. The role of fluid motion in the dynamics of phytoplankton in lakes and rivers. En: Giller PS, Hildrew AG, Raffaelli DG, editores. *Aquatic ecology: scale, pattern and processes*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. p. 141-187.
- Roldán G, Ramírez JJ. 2008. *Fundamentos de limnología neotropical*. Segunda edición. Medellín (Colombia): Editorial Universidad de Antioquia. p. 440.
- Román-Botero R, Gómez Giraldo A, Toro Botero AM. 2013. Efecto estacional de los afluentes en la estructura térmica de un pequeño embalse neotropical, La Fe – Colombia. *Dyna*, 177: 152-161.
- Ruttner F. 1975. *Fundamentals of limnology*. Tercera edición. Toronto and Buffalo: University of Toronto Press, p. 307.
- Salazar DM, Penagos GL. 2005. Impacto ambiental sobre la calidad de agua en las fuentes del sistema de acueducto de Empresas Públicas de Medellín. *Revista Empresas Públicas de Medellín*, 15: 31-39.
- Spigel RH, Imberger J, Rayner KN. 1986. Modelling the diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*, 31: 533-556.
- Tundisi JG, Matsumura Tundisi T. 2008. *Limnologia*. São Paulo (Brasil): Oficina de textos, p. 631.
- Uribe A, Roldán G. 1975. Estudio comparativo de algunas características físico-químicas y biológicas del embalse El Peñol. *Actualidades Biológicas*, 4 (11): 2-12
- Vargas A, Ramírez JJ. 2002. Variación espacio-temporal de las tasas de sedimentación del material sestónico en un embalse tropical de alta montaña: represa la Fe, El Retiro, Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas* 24 (77): 163-170.
- Wetzel RG. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. Tercera edición. San Diego (CA, U. S. A.): Academic Press. p. 1006.