

CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS DE TRES EMBALSES DE EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, COLOMBIA

María Teresa Flórez Molina^{1*}, Luis Norberto Parra Sánchez^{2*}, Sandra Viviana Bolaños Benítez^{3*}, Lina Juliana Gallo Sánchez^{4*}, Adriana Poveda Sáenz^{5*}, Diana María Agudelo Echavarría^{6*}

¹ PhD., MSc., Ing. Geóloga, Profesor Titular., Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, UdeA, Sede de Investigación Universitaria SIU, Cra. 53 No. 61-30, Medellín, Colombia. E-mail: maria.florez@udea.edu.co.

² PhD., MSc., Ing. Geólogo. Profesor Asociado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail: lnparra@unal.edu.co.

³ Candidata a PhD., MSc., Ingeniera Ambiental. E-mail: vivi_1061@hotmail.com.

⁴ PhD., MSc., Bióloga. E-mail: julianaga2003@yahoo.com.

⁵ MSc., Bióloga. G. E-mail: apsaenz@gmail.com.

⁶ Candidata a PhD., MSc., Ingeniera Ambiental. E-mail: diana.agudelo@gmail.com.

* Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA

RESUMEN

La caracterización de los sedimentos de fondo en los embalses “La Fe, Riogrande II y Porce II” de EPM, a través de la determinación de metales pesados (hierro, manganeso, plomo y el cromo), el contenido de bases (calcio, magnesio, sodio y potasio), la presencia de nitrógeno y fósforo, su granulometría y mineralogía y la clasificación de diatomeas como indicador ambiental permitió establecer la calidad ambiental de estos, siendo el embalse La Fe el que presenta mejor calidad de agua (oligomesotrófico) comparado con Riogrande II (mesotrófico–eutrófico) y Porce II (eutrófico a hipertrófico); los tres comparten características similares en cuanto al contenido de nitrógeno total Kjeldahl que está en menor concentración con relación al fósforo total. La alta abundancia y ocurrencia de *Spicaticribra kingstonii* y *D. stelligera* en La Fe, de *Fragilaria familiaris* y *Discostella stelligera* en Riogrande II y de *A. granulata* en Porce II, en el sedimento de fondo, fue un indicador del deterioro de la calidad para los embalses La Fe y Riogrande II y el mantenimiento de ese estado para el caso de Porce II.

Palabras clave: Caracterización, metales, bases, granulometría, mineralogía, nutrientes, diatomeas, sedimentos, embalses.

Recibido: 28 de julio de 2016
Received: July 28th, 2016

Aceptado: 7 de junio de 2017
Accepted: June 7th, 2017

CHARACTERIZATION OF THE SEDIMENTS OF THREE EMBALSES OF PUBLIC COMPANIES OF MEDELLÍN, COLOMBIA

ABSTRACT

Bottom sediments in the reservoirs “La Fe, Riogrande II and Porce II” properties of EPM, were characterized for environmental quality through the determination of heavy metals (iron, manganese, lead and chromium), the content of bases (calcium, magnesium, sodium and potassium), the concentrations of total nitrogen (Kjeldahl) and phosphorus, sediment granulometry and mineralogy and the classification of diatoms. “La Fe” reservoir presents the best water quality (oligomesotrophic) compared to “Riogrande II” (mesotrophic-eutrophic) and “Porce II” (Eutrophic to hypertrophic); All three share similar characteristics in terms of total nitrogen (NTK) content which is in lower concentration relative to the total phosphorus (PT). The high abundance and occurrence of *Spicaticribra kingstonii* and *D. stelligera* in “La Fe”, *Fragilaria familiaris* and

Discostella stelligera in “Riogrande II” and *A. granulata* in “Porce II”, were good indicators for the water quality at the reservoirs “La Fe” and “Riogrande II” and for the permanent eutrophy at “Porce II”.

Keywords: *Characterization, metals, bases, granulometry, mineralogy, nutrients, diatoms, sediment, reservoirs.*

Cómo citar este artículo: M. T. Flórez-Molina, L. N. Parra-Sánchez, S. V. Bolaños-Benítez, L. J. Gallo-Sánchez, A. Poveda-Sáenz, D. M. Agudelo-Echavarría, “Caracterización de los sedimentos de tres embalses de empresas públicas de Medellín, Colombia,” *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 49-63, 2017.

1. INTRODUCCIÓN

“El sedimento en los embalses desempeña un papel crucial en la dinámica de estos ecosistemas tanto desde el punto de vista hidrológico como biológico y refleja los procesos que tienen lugar en la cuenca hidrográfica. El sedimento no es un compartimiento inactivo, allí ocurren numerosos procesos biogeoquímicos que determinan el ciclo global de los elementos y no solo a escala del embalse, sino de toda la cuenca” [1]. “El sedimento es fuente de nutrientes y juega un papel esencial en los procesos que regulan su disponibilidad. La producción fitoplanctónica está directamente relacionada con la concentración de nitrógeno y fósforo disueltos, de tal forma que un incremento en la concentración de estos nutrientes implica un incremento de la biomasa algal, en un proceso conocido como eutrofización” [1].

“Los sedimentos de un sistema acuático reflejan la calidad ambiental del agua, así como las variaciones temporales de ciertos parámetros hidrológicos y químicos. Los depósitos sedimentarios son importantes en la identificación, monitoreo y distribución de metales traza contaminantes, debido a que estos metales son fijados en los sedimentos por las arcillas, óxidos hidratados de Fe, Mn y Al, carbonatos y materia orgánica” [2].

La presencia de metales en el ambiente sedimentario artificial (embalses) puede deberse a la actividad antrópica y/o a procesos naturales, tales como la meteorización, erosión de las rocas y los suelos por actividades silvopastoriles registradas en las zonas aledañas a los embalses.

El objetivo de este artículo fue hacer la caracterización de los sedimentos de fondo en los embalses La Fe, Riogrande II y Porce II de Empresas Públicas de Medellín y a partir ello determinar su calidad ambiental. Este artículo hace parte de los resultados del proyecto Sedimentos, el cual, a su vez, se enmarca dentro del Proyecto Marco “Estudio de la problemática ambiental de los embalses La Fe, Riogrande II y Porce II de Empresas Públicas de Medellín EPM-ESP para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico”, realizado por las universidades de Antioquia y nacional, sede Medellín y Empresas Públicas de Medellín, entre los años 2009 y 2016.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización del área de estudio.

El área donde se desarrolló este estudio comprende los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II, localizados en el departamento de Antioquia, Colombia Figura 1.

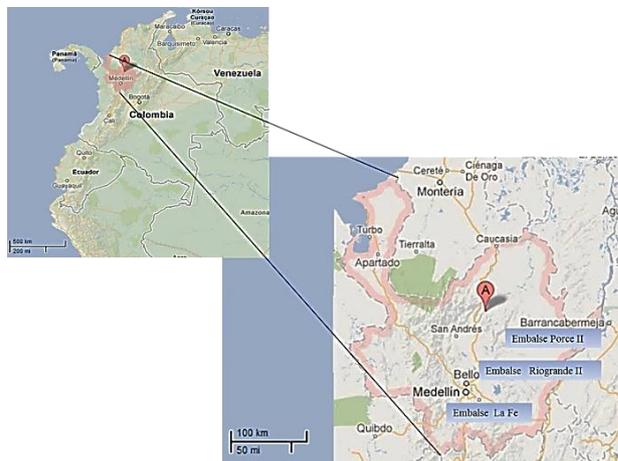


Fig. 1. Ubicación de los embalses de interés.

El Embalse Riogrande II, se localiza al Norte del departamento de Antioquia (Colombia) en jurisdicción de los municipios de Santa Rosa de Osos, Belmira, San Pedro, Entreríos y Don Matías entre las coordenadas $75^{\circ}32' 30'' W - 75^{\circ}26' 10'' W$ y $6^{\circ}33' 50'' N - 6^{\circ}28' 07'' N$, y es alimentado por tres corrientes principales: los ríos Grande y Chico, y la quebrada Las Animas drenando un área total de 1.041 km^2 hasta el sitio de presa. A diferencia de los demás embalses de EPM, en éste se realiza un aprovechamiento múltiple ya que sus aguas se usan para la generación de energía, mejoramiento ambiental y el más importante, abastecimiento de agua potable para la población del Valle de Aburrá mediante la planta Manantiales.

Las dos fuentes de agua más importantes del embalse cruzan territorios altamente intervenidos por la actividad antrópica que condicionan las características de las aguas del Embalse. El pastoreo lechero del altiplano es la actividad dominante de la zona bajo diferentes sistemas de

manejo, siendo los municipios de San Pedro, Santa Rosa de Osos y Don Matías los más tecnificados y de mayores rendimientos.

Embalse La Fe, se ubica en el Municipio de El Retiro, al Oriente del departamento de Antioquia - Colombia, en las coordenadas 75°30'15" Oeste y 06°06'50" Norte. Es un embalse de carácter multipropósito, destinado principalmente para el abastecimiento de agua potable, y adicionalmente en generación de energía hidroeléctrica y recreación. Al embalse lo abastecen afluentes que llegan naturalmente por gravedad y aguas importadas de otras cuencas mediante un sistema de bombeo. Los principales afluentes naturales son las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo, Boquerón, San Luis y Potreritos (este último desemboca en la quebrada San Luis). Las dos primeras confluyen al Norte, 1 km aguas arriba de la entrada al embalse. Al Oeste del embalse confluyen las quebradas Boquerón y San Luis, 0.3 km aguas arriba del embalse. Las aguas importadas de los ríos Buey, Piedras y Pantanillo, bombeadas desde el río Pantanillo, alimentan el embalse en periodos de estiaje. El embalse está localizado en una zona de alta montaña, de topografía circundante poco encañonada y es el resultado de dos fases de construcción; la primera fase fue finalizada en 1967 y la segunda fase, motivada por una ampliación en 1974.

Embalse Porce II, se encuentra ubicado al Noroeste del departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Gómez Plata, Yolombó y Amalfi, entre las coordenadas 75°09'14"- 75°04'59" W y 6°44'57" – 6°48'45" N, a una distancia aproximada de 120 km de la ciudad de Medellín, por la carretera que de esta ciudad conduce a las poblaciones de Amalfi y Anorí, este embalse está formado por dos ramales principales alargados, que se unen en un tercero limitado por La Presa. El primero, desde la entrada del río Porce al embalse hasta la confluencia con el brazo de la quebrada La Cancana. El segundo ramal, formado por la quebrada La Cancana. A partir de la confluencia de estos dos ramales, se origina el tercero o cuerpo principal en dirección Sureste-Noroeste hasta La Presa. El río Porce, nace en el alto de San Miguel, aproximadamente a 2700 msnm, desde donde se conoce como río Medellín. En su viaje hasta el embalse Porce II, recibe parte de las descargas de aguas residuales de aproximadamente 3,3 millones de personas que

habitan el Valle de Aburrá, hecho que se refleja en la presencia de una gran cantidad de algas y de macrófitas (*Eichhornia crassipes*), alta carga de sólidos y nutrientes.

2.2 Levantamiento de la información primaria.

El levantamiento de la información primaria se efectuó entre marzo de 2010 y diciembre de 2012, para Riogrande II, se definieron 14 estaciones, siete en La Fe y 12 en Porce II, de las estaciones definidas para cada embalse se seleccionaron tres que demarcaban una triangulación en cada uno con el objeto de realizar análisis adicionales y levantar la información sedimentológica, en cada uno de estos puntos se tomaron muestras de sedimentos con un nucleador de gravedad, recuperándose entre 35 y 45 cm en cada punto. En el embalse Riogrande II se definieron los tres puntos en las estaciones cercanas a los brazos de la quebrada Animas (Estación 5), río Chico (Estación 2) y río Grande (Estación 7); en La Fe se definieron en la Torre de Captación (Estación 3), a la entrada de las quebradas San Luis y Boquerón (Estación 4) y después del bombeo del río Pantanillo (Estación 7) y, en Porce II, se definieron en la entrada del río Porce (Estación 2), después de la confluencia de este río con las quebradas Guaduas y Cancana (Estación 7) y cerca de La Presa (Estación 12).

En cada una de las estaciones definidas en los embalses se tomaron 4 Kg de sedimentos por medio de una draga Eckman, se almacenaron en bolsas sello pack previamente rotuladas y se refrigeraron hasta su tratamiento en el laboratorio en donde se describió su textura, color, olor y apariencia, composición microscópica (orgánicos, inorgánicos, silicofósiles y mixtos), granulometría, humedad, materia orgánica (MO) determinada por pérdidas por ignición (LOI), carbono orgánico (CO), carbono inorgánico (CI), fósforo total (PT), Nitrógeno total Kjeldahl (NTK), hierro (Fe), manganeso (Mn), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), cromo (Cr) y mercurio (Hg).

El análisis granulométrico de las fracciones gruesas como gravas y arenas (A), se hizo mediante el método del tamizaje con tamices A.S.T.M., cada ¼ phi y la determinación de limos (L) y arcilla (Ar) se realizó con el método de la pipeta. La determinación de metales pesados y bases se realizaron por el método de digestión ácida para preparar la muestra y las lecturas se realizaron mediante el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (Hitachi Z-8100) con llama para todos los elementos, excepto para el Hg que se determinó

por vapor frío. Estos análisis fueron efectuados en el laboratorio del grupo de investigación GAIA de la Universidad de Antioquia (Tabla 1).

Tabla 1. Variables físicas y químicas y métodos analíticos en sedimentos.

VARIABLE	MÉTODO
Materia orgánica (MO)	LOI (%) [3]
Carbono orgánico (CO)	LOI (%) [3]
Carbono inorgánico (CI)	Method of Gravimeter [4]
Nitrógeno total (NTK)	4500 Norg-B (APHA-AWWA-WEF, 2005) [5]
Fósforo total (PT)	
Hierro (Fe)	Absorción atómica EPA-200.2 [6]
Magnesio (Mg)	
Manganeso (Mn)	
Calcio (Ca)	
Sodio (Na)	
Potasio (K)	
Cromo (Cr)	
Cadmio (Cd)	

Para determinar el nitrógeno total Kjeldahl (NTK), a 1.5 gr de sedimento húmedo se le adicionaron dos pastillas de CuSO_4 y 20 mL de H_2SO_4 concentrado. Posteriormente, se destilo la muestra con 80 mL de H_3BO_3 al 4% y se tituló con H_2SO_4 0.01 M.

Para determinar la concentración de fósforo total, se adicionaron 50 mL de agua destilada a 0,1 gr de sedimento seco. Posteriormente, se hizo una digestión con H_2SO_4 y HNO_3 , se filtró la muestra y se le adicionaron 15 mL de agua destilada. Luego, se neutralizó la muestra, se desarrolló el color y se leyó en el espectrofotómetro a 880 nm. Adicionalmente, se tomaron en cada embalse núcleos de sedimentos con un nucleador de gravedad para estudiar la composición de los sedimentos. De particular interés son los restos de fitoplancton como las frústulas de las diatomeas que permiten inferir las relaciones de fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl y materia orgánica presentes en el cuerpo de agua y por lo tanto con grupos de diatomeas que pudieran dar evidencias de la calidad de agua en el pasado cercano de las aguas del embalse.

3. RESULTADOS

La textura de los sedimentos en los tres embalses mostró ligeras diferencias entre las estaciones de los tributarios y de la zona lentic y a través del tiempo.

Para el embalse Riogrande II, mientras que en los tributarios predominan las arenas, en la zona lentic predominan texturas más finas y aumentan

las proporciones de arcillas y limos. La textura promedio del sedimento fue areno limo arcilloso (ALAr) con una proporción del 48% de arenas, el 26% de limos y el 13% de arcillas, proporciones que variaron ligeramente, desde arenosas, areno limosas y/o arcillo limos arenosas, con aumentos locales arcillas o limos en las estaciones 6, 12, 15 y 17, Figura 2a.

Los colores de los sedimentos (Tabla de Colores de Munsell), fueron variables entre pardo, pardo grisáceos y oliva (10YR3/2, pardo grisáceo muy oscuro; 10YR3/6, pardo amarillento oscuro; 2.5Y4/4, pardo oliva; 5Y3/2, gris oliva oscuro; 5YR3/2, gris oliva oscuro y 5Y4/3, oliva; etc.); el olor varió entre porqueriza, fósforo u óxido, olor relacionado con la temporalidad de muestreo y el color del sedimento, los tonos grises u olivas coinciden con procesos geoquímicos de reducción (olor a porqueriza) y los colores pardos a pardo amarillento corresponden con entradas de oxígeno al sistema, periodos de oxidación (olor a óxidos).

Los datos promedios de los microcomponentes indican la predominancia de inorgánicos en un 41.63% y de silicofósiles en un 26.65%. En contraste, los orgánicos representaron solo el 11.15% y los organominerales el 20.6%. Estas proporciones al igual que los contenidos de materia orgánica inferiores al 23%, permiten calificar a los sedimentos del embalse como inorgánicos (68.28% de inorgánicos y 31.75% de silicofósiles), Figura 2b. La Figura 2c, muestra la variación de la materia orgánica se determinó a través de las pérdidas por ignición o LOI en todas las estaciones y muestreos. El promedio del LOI en todas las estaciones y muestreos alcanzo 22.66%, valores relativamente altos. El LOI en el 2010, 2011 y 2012 en promedio fue de 14.76%, 30.70% y 14.07%, respectivamente. En los muestreos del 2011, especialmente en diciembre, hubo un aumento considerable del contenido de materia orgánica y el valor fue superior al 70%. Esta variable influyo el aumento del CO y curiosamente el CI presentó el valor más bajo de todos los muestreos. El valor medio de CO en el sedimento fue de 8.56% en el 2010, 17.81% en el 2011 y de 8.16% en el 2012 y el promedio general alcanzo 12.54%, relativamente alto. El alto valor medio en el 2011 estuvo relacionado con el aumento de la MO en el mismo periodo. El CI en el sedimento en promedio fue bajo, 3.05%; en el 2010 fue de 2.81%, en el 2011 de 2.27% y, en el 2012 de 2.93%. El valor máximo de CI en abril de 2012, asociado principalmente a las estaciones 4 y 5 (Torre de Captación y quebrada Las Animas, respectivamente).



Fig. 2. Características físico químicas de los sedimentos del embalse Riogrande II (de arriba hacia abajo composición promedio de: 2a-textura; 2b-microcomponentes, 2c-LOI, CO, CI; y 2d-composición química, respectivamente).

Las concentraciones de Ca, Mg, Na y K (Figura 2d), fueron relativamente bajas y muy similares, en promedio para todos los muestreos fueron de 500.96 mg/kg para el Ca, 225.12 mg/kg para el Mg; 303.29 mg/kg para el Na y de 2429.13 mg/kg para el K, Figura 2d.

Mientras el río Grande y la quebrada Las Ánimas presentaron los mayores aportes de Fe y de Mn, el Cr y Pb no fueron detectados en ninguno de los tributarios. Las elevadas concentraciones de Cr en los sedimentos del brazo del río Chico, con respecto al resto del embalse, permiten inferir que este río es la principal fuente de este metal.

Se trabajó sobre la difusión y transferencia de metales pesados desde el sedimento hacia la columna de agua o desde esta al sedimento (interfase agua-sedimento) utilizando para ello columnas experimentales tomadas en tres estaciones estratégicas del embalse: estación 2 brazo río Chico, estación 5 brazo quebrada Las Animas y estación 7 brazo río Grande.

De acuerdo con los resultados de [7], la concentración del Fe fue ligeramente superior en las estaciones 2 y 5. En todas las estaciones el flux en el sedimento fue del mismo orden de magnitud e indicó la posibilidad de liberarse desde el sedimento hacia la columna de agua.

En la estación 7, se encontró la mayor concentración de Mn en los sedimentos, posiblemente porque dicha estación está influenciada por los aportes del río Grande. En esta estación la fracción biodisponible se incrementó gradualmente con el tiempo en condiciones estáticas.

Los resultados del flux indicaron que este metal puede liberarse a la columna de agua. Las elevadas concentraciones de Cr en el brazo del río Chico, demuestran aportes importantes desde la cuenca. Para todas las estaciones el flux fue del mismo orden de magnitud (Tabla 2).

Se podría afirmar que en el embalse las estaciones 2, 5 y 7 el sedimento está moderadamente contaminado con Cr y con Pb, este último aumenta su biodisponibilidad bajo condiciones estáticas, posiblemente debido a la disolución de óxidos e hidróxidos de Mn (condiciones Redox).

Los factores de enriquecimiento de Fe, Mn y Cr permiten clasificar a los sedimentos como contaminados, especialmente en la estación 7 ubicada en la entrada del río Grande al embalse [7]. El PT (1292.28 mgP/Kg), ya que el valor medio de esta variable fue clasificado inclusive como elevado y en muchos sitios especialmente ubicados en el

brazo del río Chico se superaron los valores de 1170 mg/Kg (Figura 3a).

Tabla 2. Flux de Fe, Mn, Cr y Pb totales en agua y sedimento y coeficiente de difusión en agua en las estaciones 2, 5 y 7 en el embalse Riogrande II (Tomado de [7]).

Estación	Flux de Fe(mg/cm ² s)		Coeficiente de difusión de Fe (cm ² /s)
	Agua	Sedimento	
2	-3.74 E-08	-3.62 E-06	0.00014
5	-2.68 E-08	-7.45 E-06	0.00042
7	-1.56 E-08	-8.22 E-06	0.00030

Estación	Flux de Mn (mg/cm ² s)		Coeficiente de difusión (cm ² /s)
	Agua	Sedimento	
2		7.15 E-09	
5		6.23 E-08	
7	-1.4 E-05	-5.65 E-08	0.00030

Estación	Flux en los sedimentos (mg/cm ² s)	
	Cr	Pb
2	-4.29 E-09	-1.58 E-10
5	-2.50 E-09	-2.91 E-09
7	-4.29 E-09	-3.99 E-10

El Hg, en los sedimentos del embalse Figura 4, presentó un comportamiento bastante irregular y fue alta la variabilidad espacial y temporal. En el 2010 los valores fueron bajos e inferiores a 150 µg/kg y los valores más altos se registraron la estación 2 o brazo del río Chico.

Durante los muestreos del 2011 las concentraciones se incrementaron lentamente con respecto a lo reportado en el 2010, las mayores se registraron en septiembre de 2011, las cuales fueron inferiores a 350 µg/kg y más altas en las estaciones 1, 2 y 3 (brazo del río Chico) y en las estaciones 8, 9 y 10 (zona limnética); en diciembre de 2011 estas concentraciones decaen fuertemente, coincidiendo con lo reportado para los demás metales; en abril del 2012 subió un poco siendo más alta la concentración en las estaciones 1 y 6, entrada de los ríos Chico y Grande, respectivamente.

El valor medio de NTK tuvo un valor medio de 412.05 mgN/Kg, relativamente bajo. Tanto la concentración de MO (LOI), la del PT y la del NTK, presentaron un gradiente espacial horizontal y parece que las condiciones están dadas para que en su mayoría el sedimento sea retenedor de fósforo, especialmente en el brazo del río Chico,

favorecido por la alta concentración de hierro en el sedimento (Figura 3a).

La concentración de materia orgánica (LOI), fósforo total y de NTK en los sedimentos superficiales del embalse, presentaron un gradiente espacial horizontal a pequeña escala (a cortas distancias). Para este embalse parece que las condiciones están dadas para que en su mayoría el sedimento superficial sea retenedor, de fósforo, especialmente en el brazo del río Chico, favorecido por la alta concentración de hierro en el sedimento, y relativamente altas concentraciones de fósforo en la columna de agua.

La comunidad de diatomeas del embalse Riogrande II [8], se caracterizó por estar en su mayoría conformada por taxones perifíticos (92%), es decir epipelicos, epifíticos y en menor porcentaje (8%) por diatomeas planctónicas, no obstante, dentro de este grupo, *Aulacoseira granulata* fue una de las especies más abundantes y comunes en el embalse.

Con relación a la distribución espacial horizontal de las diatomeas en muestras de sedimento reciente del embalse no se observó una preferencia de algunos de los taxones más abundantes por un sector de este; los taxones más abundantes como *Fragilaria familiaris* y *Aulacoseira granulata* se asociaron con algunas de las variables estudiadas y su ecología, por ejemplo, con valores por encima de la media de materia orgánica se asociaron *Fragilaria familiaris*, *Cyclotella meneghiniana*, *Discostella stelligera* y *Discostella pseudostelligera*. Con valores por debajo de la media de materia orgánica *Fragilaria capucina*, *Fragilaria capucina var. vaucheriae*, *Gomphonema parvulum*. Con relación a valores cercanos a la media o superiores a esta de fósforo total (1292 mgP/Kg), *Melosira varians*, *Cocconeis placentula*, *Gomphonema parvulum* y *Navicula sp.*; *Tabellaria flocculosa* y *Rhoicosphenia sp.*, mostraron sus frecuencias máximas en las estaciones con valores de NTK por debajo del cuartil superior (2917.60 mgN/Kg), es decir con valores mayores al valor medio registrado en el embalse [8].

Para el embalse La Fe, en las estaciones 6 y 7 ubicadas en el Cuenco Sur e influenciadas por el bombeo del Pantanillo predominaron texturas areno limo arcillosas (ALAr) mientras en las estaciones del Cuenco Norte a la entrada de las quebradas Palmas y Espíritu Santo al embalse predominaron las texturas arcillo limo arenoso (ArLA). En la estación 12, que recibe las aguas del río Pantanillo,

la textura varió entre arcillo limo arenoso (ArLA), limosa o limo arcillo arenosa (L/LArA).

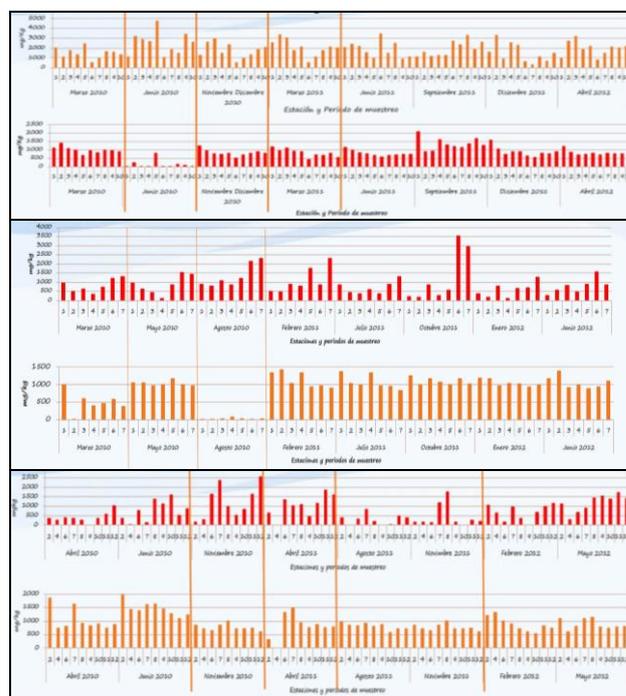


Fig. 3. Contenido de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y fosforo total en los embalses Riogrande II (Fig. 3a), La Fe (Fig. 3b) y Porce II (Fig. 3c).

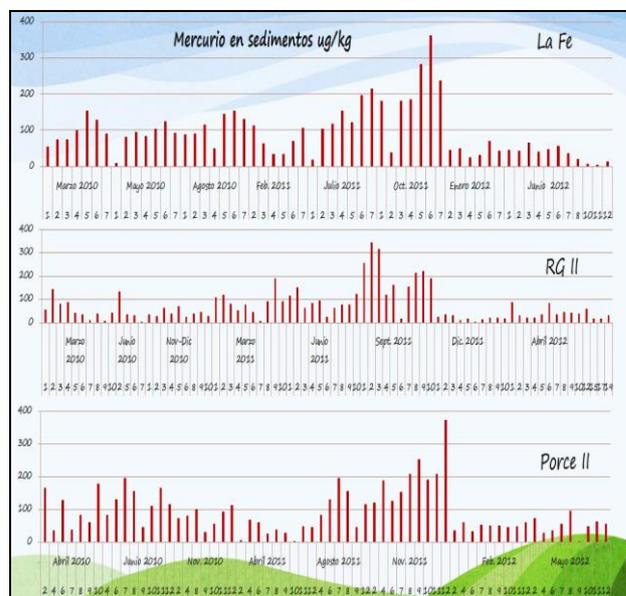


Fig. 4. Contenido de mercurio (Hg) en los embalses Riogrande II (Fig. 4a), La Fe (Fig. 4b) y Porce II (Fig. 4c).

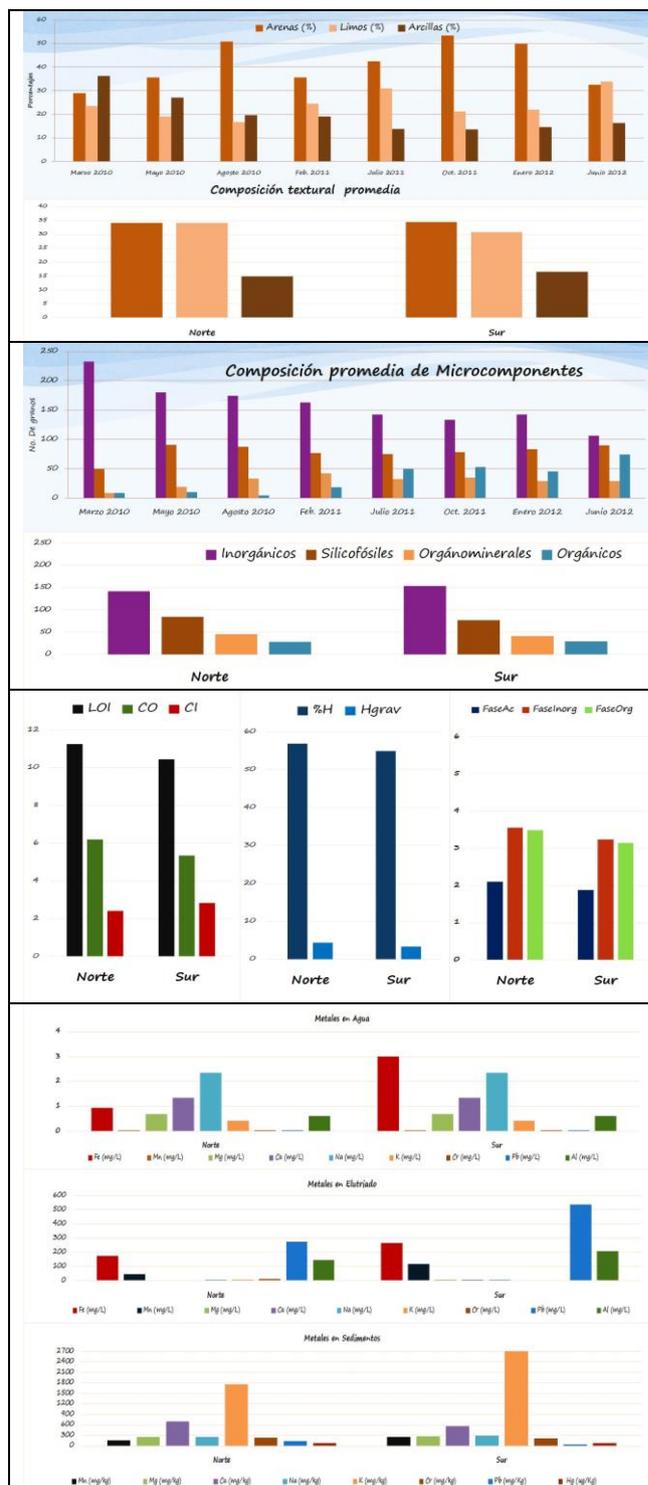
En las estaciones 3, Torre de Captación y en la estación 6, Limnocorral (punto de control permanente de EPM, que coincide con la estación 6 de esta investigación, sitio más profundo del embalse, 26 m, Cuenco Sur), los sedimentos presentan laminación (láminas de 1 cm de colores gris claro y gris oscuro casi negros intercaladas), con texturas limo arcillosas (LAr).

En general, en el área de influencia de las descargas de las quebradas Palmas, Espíritu Santo, San Luis y Boquerón (estaciones 8, 9, 10 y 11), predominan las texturas areno gravillosas con gravas que pueden alcanzar diámetros de hasta 10 o 15 cm (Figura 5a).

Los colores de los sedimentos variaron entre pardo, pardo grisáceos y oliva, en las estaciones 3 y 6, localizadas en cercanía de la Torre de Captación y de La Presa respectivamente, los sedimentos eran grises oscuros y claros y estaban laminados; el olor de los sedimentos varió entre porqueriza, fósforo u óxido.

Los contenidos de MO fueron muy irregulares y extrañamente mayores en el periodo seco que en los lluviosos y mayores en las estaciones limnéticas que en los tributarios. En promedio los porcentajes fueron bajos durante todos los muestreos, nunca superaron el 16% y disminuyeron con el tiempo. El contenido de microcomponentes fue relativamente similar en cantidad y en clases, predominando los inorgánicos y silicofósiles sobre los orgánicos y organominerales. Estos últimos aumentaron con el tiempo al igual que la presencia de minerales de neoformación (caolinitas, principalmente) y el estado de alteración que presentan algunos minerales como es la cantidad de óxidos de hierro y manganeso adheridos a las superficies y bordes de estos y la presencia de organominerales, resinas y silicofósiles (los valores promedios de microcomponentes fueron: inorgánicos 53.13%, silicofósiles 26.32%; orgánicos 9.49% y los organominerales el 11.05%. Estas proporciones al igual que los contenidos de MO inferiores al 13%, permiten calificar a los sedimentos del embalse como inorgánicos (inorgánicos más silicofósiles con el 79.45% del total de microcomponentes), Figura 5b.

Aunque los inorgánicos fueron los más abundantes en los ocho muestreos, disminuyen en el tiempo, los silicofósiles se mantuvieron relativamente estables después de marzo de 2010 y los organominerales aumentaron. Por su parte, los orgánicos fueron muy bajos en el 2010, un poco más altos en el 2011 y luego disminuyen en el 2012.



Los contenidos de orgánicos, Figura 5c, fueron muy irregulares y extrañamente mayores en el periodo seco que en los lluviosos y mayores en las estaciones limnéticas que en los tributarios. En promedio los porcentajes fueron bajos durante todos los muestreos, nunca superaron el 16% y disminuyeron con el tiempo. El contenido de microcomponentes fue relativamente similar en cantidad y en clases, predominando los inorgánicos y silicofósiles sobre los orgánicos y organominerales. Estos últimos aumentaron con el tiempo al igual que la presencia de minerales de neoformación (caolinitas, principalmente) y el estado de alteración que presentan algunos minerales como es la cantidad de óxidos de hierro y manganeso adheridos a las superficies y bordes de estos y la presencia de organominerales, resinas y silicofósiles (los valores promedios de microcomponentes fueron: inorgánicos 53.13%, silicofósiles 26.32%; orgánicos 9.49% y los organominerales el 11.05%. Estas proporciones al igual que los contenidos de MO inferiores al 13%, permiten calificar a los sedimentos del embalse como inorgánicos (inorgánicos más silicofósiles con el 79.45% del total de microcomponentes). Aunque los inorgánicos fueron los más abundantes en los ocho muestreos, disminuyen en el tiempo, los silicofósiles se mantuvieron relativamente estables después de marzo de 2010 y los organominerales aumentaron. Por su parte, los orgánicos fueron muy bajos en el 2010, un poco más altos en el 2011 y luego disminuyen en el 2012.

La MO (LOI) fue en promedio del 11%, valor relativamente bajo teniendo en cuenta que el embalse recibe la influencia directa de los aportes de las microcuencas que están muy afectadas por descargas de aguas servidas provenientes de las actividades humanas, igual como ocurre con el bombeo del río Pantanillo. El carbono orgánico en el sedimento alcanzó un promedio de 6.93%, el carbono inorgánico (CI) fue en promedio de 2.07 g. Los valores de metales pesados fueron bajos e irregulares y mostraron alta variabilidad espacial y temporal (Figura 5c).

Las concentraciones de las bases totales nunca sobrepasaron los 8000 mg/kg y, en el caso del Al y del Fe, nunca pasaron del 20%, y para el Cr, Pb y Mn los valores estuvieron por debajo de 2000 mg/kg. El Mn, Cr y Pb, también presentaron concentraciones muy bajas (205.06 mg/kg para el Mn, de 219.92 mg/kg para el Cr y de 94.65 mg/kg para el Pb (Figura 5d).

Se midió [7] el coeficiente de difusión (cm^2/s) para el Fe^{2+} como ión simple a partir de la temperatura

media del agua de 22.3°C con base en la ecuación Boudreau (1999) y encontró un valor de $6.59 \times 10^{-06} \text{ cm}^2/\text{s}$. En las columnas de experimentación de la estación 7, este autor cuantificó la mayor concentración de Fe Total y el flux ($-2.25 \text{ E}^{-05} \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) y evidenció posibles procesos de liberación, Tabla 3.

Los resultados del flux para el Mn Total en el sedimento, presenta un orden de magnitud similar en todas las estaciones del embalse, pero con signo diferente. Mientras en la estación 3 el flux positivo indicando un flujo de Mn del agua al sedimento, en las estaciones 4 y 7 la dirección es contraria y el sedimento es fuente potencial de Mn bajo las condiciones de laboratorio estudiadas.

Tabla 3. Flux de Fe, Mn, Cr y Pb totales en agua y sedimento y coeficiente de difusión en agua en las estaciones 3, 4 y 7 en el embalse La Fe (Tomado de [7]).

Estación	Flux de Fe ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)		Coeficiente de difusión de Fe (cm^2/s)
	Agua	Sedimento	
3	-7.11×10^{-10}	-9.82×10^{-06}	4.2×10^{-04}
4	-1.25×10^{-09}	-1.76×10^{-06}	0.01140
7	-1.79×10^{-09}	-2.29×10^{-05}	3.6×10^{-04}

Estación	Flux en los sedimento ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)		
	Mn	Cr	Pb
3	3.02×10^{-08}	3.68×10^{-08}	3.42×10^{-10}
4	-3.81×10^{-08}	1.17×10^{-07}	2.36×10^{-09}
7	-7.17×10^{-08}	-4.69×10^{-08}	-9.86×10^{-09}

De acuerdo con [7], los resultados de los flux encontrados en las estaciones 4 y 7 se facilita el flujo de este metal desde el sedimento hacia el agua, lo cual es frecuente en los estudios. No obstante, la estación 4 presentó los mayores factores de enriquecimiento mientras que en la estación 7 son bajos. Estos resultados indican que las características del sedimento en esta estación y las condiciones Redox favorecen los flujos de Mn desde el sedimento. En la estación 3, se observó un comportamiento contrario, lo cual estaría indicando que el Mn no se liberó al agua bajo las condiciones estudiadas. A pesar de que los flux citados corresponden a ecosistemas de otras latitudes el orden de magnitud es similar. Los resultados del flux para el Cr Total en el sedimento muestran que el Cr fue superior en las estaciones 3

y 7, en la estación 4 menor (el factor de enriquecimiento y flux fue de $71.17 \text{ E}^{-07} \text{ mg/cm}^2\cdot\text{s}$). La estación 7 presentó un flux negativo lo cual indica la migración de Cr desde las capas más profundas del sedimento y que potencialmente pueden llegar al agua (Tabla 3).

El flux de Pb Total en el sedimento presentó el mismo comportamiento entre estaciones que el Cr Total, es decir, mientras en las estaciones 3 y 4 se presentaron flujos desde el sedimento superficial hasta el fondo, en la estación 7 ocurre lo contrario. El Pb fue menor en las columnas de las estaciones 3 y 4 sin embargo, los factores de enriquecimiento fueron superiores.

Comparando los flux con los de Fe y Mn cabe destacar que el orden de magnitud es similar y que en la estación 7 se favorece la difusión de estos metales desde el sedimento hacia la columna de agua. De acuerdo a los factores de enriquecimiento de Cr y Pb en los sedimentos, en las estaciones 3, 4 y 7 el sedimento es moderadamente contaminado.

El Hg en los sedimentos del embalse (Figura 4) tuvo en general, un comportamiento bastante irregular y poco consistente entre periodos y estaciones de muestreo, fue alta la variabilidad espacial y temporal, el valor promedio general fue de $95.27 \mu\text{g/kg}$ siendo el valor más alto ($360.82 \mu\text{g/kg}$) el que se registró en la estación 6 (limnocorral) localizada en el Cuenco Sur en octubre de 2011 y el más bajo ($5.25 \mu\text{g/kg}$) en la estación 11 (quebrada Boquerón) localizada en el Cuenco Norte en junio de 2012.

Las concentraciones de ortofosfatos en los principales afluentes del embalse presentaron una mediana de $0.0091 \text{ mgP-PO}_4^{3-}/\text{L}$ y oscilaron entre <0.0091 y $0.1848 \text{ mgP-PO}_4^{3-}/\text{L}$. Los valores medios de fósforo total (707.49 mgP/Kg), Figura 3, en el sedimento fueron considerados como concentraciones medias con base en la literatura revisada, mientras que el valor medio del nitrógeno total Kjeldahl (278.7 mgN/Kg en peso seco fue bajo. La relación N/P en el embalse, mostro que el nitrógeno es retenido en el sedimento en menor proporción. Esto puede estar asociado con la estabilidad térmica del cuerpo de agua, la concentración de oxígeno en el hipolimnio, el gradiente de concentración de amonio en la interfase agua-sedimento y el acople entre los procesos de nitrificación y desnitrificación.

En el caso del embalse La Fe, los mayores valores de riqueza de especies, diversidad y equidad se registraron en el Cuenco Norte menos profundo que el Cuenco Sur, producto posiblemente de los

aportes de diatomeas desde los tributarios, y la presencia de *E. densa*, que representa para estos organismos un hábitat, de ahí que el mayor número de taxones que constituyen la comunidad de diatomeas en todo el embalse sea en su mayoría constituido por taxones bentónicos [8], la dominancia fue mayor en el Cuenco Sur, el menor tiempo de renovación del agua permite una mayor estabilidad por parte de algunos taxones, entre ellos las diatomeas *Spicaticribra kingstonii* y *Discostella stelligera*, que suelen asociarse a sitios profundos. Con relación a las diatomeas centrales, los especímenes encontrados en el sedimento superficial de *Spicaticribra kingstonii*, son el primer reporte para Colombia [8], aunque su ecología no ha sido bien establecida, en el embalse La Fe, las mayores frecuencias relativas de este taxón se asocian con los sitios donde se registraron valores bajos de materia orgánica y altos de fósforo total en las muestras de sedimento superficial, y en las muestras de núcleo de sedimento que tiene estas características.

Dicostella stelligera se caracteriza por estar presente en ambientes oligo, meso y eutróficos, asociada con eventos de deforestación. Como una especie perifítica que ocurre en ambientes meso a eutróficos y que tolera concentraciones altas de nitrógeno orgánico se ha reportado *Cocconeis placentula*. Por su parte, *Nitzschia palea*, ha sido encontrada en ambientes hipereutróficos, tolera altas concentraciones de nitrógeno orgánico. Taxones como *Discostella stelligera*, *Cocconeis placentula*, *Nitzschia palea*, indican una importante carga antrópica en el sistema, especialmente *Nitzschia palea* la cual se encuentra en frecuencias altas en ambientes hipereutróficos [8]. Esto es señal del deterioro de la calidad del agua del embalse. De ahí que el embalse haya pasado de mesoeutrófico a eutrófico y prueba de ello son los valores altos de PT en la columna.

Para el embalse Porce II, durante los tres años de muestreo (2010, 2011 y 2012), las granulometrías fueron muy similares predominando las texturas ligeramente gruesas, Figura 6. El resultado final es un sedimento que se distribuye sin seguir un gradiente granulométrico (Figura 6a). Las granulometrías limo areno arcillosas (LArA) son dominantes en las entradas del río Porce y de las quebradas La Cancana y Guaduas mientras que en la zona donde se va perdiendo la influencia de estos tributarios y en la zona propiamente limnética.



Fig. 6. Características físico químicas de los sedimentos del embalse Porce II (de arriba hacia abajo composición promedio de: 6a-textura; 6b-

microcomponentes, 6c-LOI, CO, CI; y 2d-composición química, respectivamente).

Las granulometrías dominantes son las arenas limo arcillosas (ALAr) o limo areno arcillosas (LAAr) debido a un desplazamiento relativamente rápido de los materiales depositados desde la cola. Hacia La Presa las texturas más dominantes son las arenosas (A) o las areno limosas (AL). Los colores son pardos, pardos grisáceos a olivas; no plásticos ni pegajosos, el olor puede variar entre porqueriza, fósforo u óxido, olor muy relacionado con la temporalidad de muestreo y el color del sedimento. En la estación 12 localizada en cercanía de la Presa los sedimentos son de colores grises oscuros (casi negros) y grises claros y es evidente la laminación.

Los datos promedios de los microcomponentes (Figura 6b) indican la predominancia de los inorgánicos en un 49.8% y de los silicofósiles en un 27.27%. En contraste, los orgánicos representaron solo el 8.93% y los organominerales el 11.97%. Estas proporciones al igual que los contenidos de materia orgánica inferiores al 12%, permiten calificar a los sedimentos del embalse como inorgánicos (77%, inorgánicos más silicofósiles; el restante 20.80% son orgánicos más organominerales).

La materia orgánica medida como pérdidas por ignición (LOI), el carbón orgánico (CO) y el carbón inorgánico (CI), son relativamente bajas en todas las estaciones, los promedios generales fueron 11.3%, 6.0% y 2.5%, respectivamente, Figura 6c.

Los valores de metales pesados muestran que los contenidos de éstos son bajos e irregulares entre estaciones y entre periodos de muestreos (Figura 4d), para el caso de las bases totales Ca, Mg, Na y K, las concentraciones nunca sobrepasaron los 12000 mg/kg, en el caso del Al, nunca pasaron de 180000 mg/kg, para el Cr, Pb y Mn los valores estuvieron por debajo de 900 mg/kg, Figura 5d.

Para el Fe los valores fueron más altos y se llevaron a porcentajes, pero estos fueron inferiores del 20%. En cuanto a los contenidos de Mn, Cr y Pb, las concentraciones fueron relativamente bajas, en promedio para todos los muestreos fueron de 379.5 mg/kg para el Mn, de 171.3 mg/kg para el Cr y de 60.9 mg/kg para el Pb. El Fe fue el metal más abundante y el de menor concentración el Hg, no indicando esto que un alto o bajo valor en la concentración significa una alta o baja toxicidad. En promedio la concentración de estos metales fue de la siguiente forma; para el Fe 76.65 mg/L, Mn 6.26 mg/L, Al 52.69 mg/L, Cr 0.81 mg/L, Pb 0.12 mg/L;

el Ca 18.6 mg/L, el Na 30.57 mg/L, el Mg 6.75 mg/L y el K 7.61 mg/L.

Las mayores concentraciones se presentaron en las estaciones ubicadas en la zona limnética y asociadas a los muestreos realizados en el 2011, coincidiendo con el aumento del caudal por las altas precipitaciones registradas en la época (Fenómeno de La Niña). Lo interesante es que todas disminuyeron sus concentraciones extremadamente en los muestreos realizados en febrero y mayo del 2012.

El Hg en los sedimentos del embalse (Figura 4), tuvo un comportamiento irregular y poco consistente entre periodos y estaciones de muestreo, fue alta la variabilidad espacial y temporal, el valor promedio general fue de 180.6 µg/kg siendo el valor más alto (385.2 µg/kg) el que se registró en la estación 12 cerca de La Presa en noviembre de 2011 y el más bajo (3.5 µg/kg) en la estación 9 en mayo de 2012.

El del PT en promedio presentó concentraciones de 716.8 mgP/Kg, en algunos periodos su valor fue superior a los 1170 mgP/Kg (Figura 3c). Las concentraciones de ortofosfatos en los principales afluentes del embalse, en los ocho muestreos, presentaron una mediana de 0.045 mgP-PO₄³⁻/L y un coeficiente de variación de 189.34%. Los valores oscilaron entre 0.0100 mgP-PO₄³⁻/L en mayo de 2012 en la estación 3 y 0.7422 mgP-PO₄³⁻/L en junio de 2010 en la estación 5. Estos niveles fueron altos. La concentración del NTK osciló entre 253.44 mgN/Kg y 2606.24 mgN/Kg. Esta variable tiende a presentar valores entre 253.44 y 1429.84 mgN/Kg mucho más altos cerca de la confluencia del río Porce y la quebrada La Cancana.

La relación N/P de los sedimentos del embalse, en general muestra valores por debajo de 16, con pocas excepciones lo que mostro que el nitrógeno es retenido en el sedimento en menor proporción y el fosforo es el nutriente que se está acumulado en mayor proporción en el embalse y convirtiéndose en una potencial fuente interna de este nutriente (Figura 3). Estos resultados demuestran que el embalse está realizando la función de una planta de tratamiento de sus ríos afluentes, como por ejemplo el río Porce, algo así como un reactor químico y biológico. Si este fósforo es retenido y las condiciones fueran extremadamente reductoras al punto de aumentar la eutrofización del embalse, el fósforo podría volver a solubilizarse y a estar biodisponible.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el embalse Porce II, predominan las diatomeas bentónicas, sobre las planctónicas, en cuanto a

riqueza de especies [8], con relación a la frecuencia relativa, la diatomea planctónica *Aulacoseira granulata* se distribuyó en todo el embalse con frecuencias relativas altas. Con relación al LOI, *Cyclotella meneghiniana* presentó unas altas frecuencias relativas en sitios donde esta variable registró los mayores valores. Mientras que una gran cantidad de taxones, se asociaron con valores bajos como *Cyclostephanos dubius*, *Stephanodiscus hantzschii* var. *tenius*, *Fragilaria capucina*, *Cocconeis placentula*, *Achnantheidium* sp. 5, *Luticola* sp. 8, *Navicula notha*, *Navicula* aff. *rostellata*, *Navicula schroeteri*, *Gomphonema* aff. *parvulum*, *Nitzschia sigma*, *Nitzschia palea* y *Rhoicosphenia* sp. Con relación al fósforo total, *N. palea* y *G. parvulum* registraron mayores frecuencias en estaciones donde se presentaron valores bajos e intermedios de esta variable. Con valores bajos de NTK se asoció *Fragilaria familiaris*. *Aulacoseira granulata*, de habito principalmente planctónico, mostró una gran adaptación en el sistema, de ahí que fuera encontrada en todas las estaciones que se tuvieron en cuenta para este análisis, con frecuencias relativas altas, y muy superiores a las de los demás taxones; su abundancia fue mayor en las estaciones más profundas del embalse, ubicadas en el cuerpo de agua principal. *Cyclotella meneghiniana*, es un taxón con distribución cosmopolita, hallado en el plancton y adherido a diferentes sustratos en aguas eutróficas.

Según [8], en el embalse, al igual que *A. granulata*, presentó frecuencias altas en el cuerpo de agua principal, en estaciones donde la materia orgánica registró valores altos. Entre los taxones que registraron frecuencias relativas altas en estaciones donde la materia orgánica fue baja están: *Stephanodiscus hantzschii*, indicadora de eutrofización [8]; *Navicula schroeteri*, encontrada en el plancton y adherida a sustratos en ambientes oligotróficos y eutróficos; *Cyclostephanos dubius*, que es indicadora de ambientes eutróficos.

Los mayores valores de riqueza de especies [8], diversidad y equidad en el sector de aguas lólicas del embalse Porce II, pueden ser producto de los aportes de diatomeas por parte de los tributarios, y la presencia además de la macrófita flotante *E. crassipes* que representa para estos organismos un hábitat, de ahí que el mayor número de taxones que constituyen la comunidad de diatomeas en todo el embalse sea en su mayoría bentónicos.

La mayoría de los taxones más representativos de la comunidad de diatomeas de sedimento superficial, se caracterizan por ser tolerantes a alta

polución y son indicadores de condiciones eutróficas del sistema.

4. CONCLUSIONES

El embalse La Fe el que mejor calidad de agua presenta (oligomesotrófica) comparado con Riogrande II (mesotrófico–eutrófico) y Porce II (eutrófico a hipertrófico). Con relación al sedimento superficial los tres comparten características como nitrógeno total Kjeldahl (NTK) en menor concentración con relación al fósforo total (PT) y una heterogeneidad espacial a distancias cortas en la distribución de materia orgánica (MO), PT y NTK. La MO oscilo entre 13,7% y 27,5% en el embalse La Fe, en Riogrande II vario entre 15,2% y 26,2% y en Porce entre 9,7% y 18,5%. El PT en La Fe fue de 0,8 %, en Riogrande II 0.16 % y en Porce II de 0.9 %. El NTK en el embalse La Fe se mantuvo entre 0,06% y 0,11% en Riogrande II vario entre 0,14% y 0,28% y en Porce entre 0,04% y 0,14%.

Se esperaba que Riogrande II y Porce II, se parecieran más en la composición de sus sedimentos ya que las aguas del primero se conectan con las del segundo cuando llegan al río Porce y que este último y La Fe difirieran. Sin embargo, se observa una mayor relación en cuanto a las variables ambientales entre los embalses La Fe y Porce II ya que comparten concentraciones de PT y NTK en los sedimentos muy similares.

Esto puede deberse en parte a que la macrófitas *Elodea crassipes* en el embalse Porce II fija el fósforo y el nitrógeno antes de que lleguen al fondo del embalse y las altas temperaturas en aguas de fondo (superiores a 19°C), lo convierten en un reciclador rápido de MO, reduciéndola hasta niveles casi similares a los encontrados en los sedimentos de La Fe. Otra característica que es particular de estos dos sistemas es el bajo tiempo de retención de agua debido a la alta demanda para generación de energía eléctrica en el caso de Porce II y de agua potable en el caso de La Fe.

Riogrande II, por el contrario, presenta en el sedimento concentraciones apreciables de estos compuestos, en especial de MO y PT y las macrófitas escasamente se observan en la entrada del río Chico al embalse, es en este sector donde mayores concentraciones especialmente de PT se encontraron en el sedimento.

Con relación a las diatomeas, las perifíticas sobrepasan en número a las planctónicas, tanto en el sedimento superficial como en las muestras de sedimento de los núcleos recuperados en los tres embalses, debido en parte a que estos sistemas

son abastecidos por quebradas y ríos donde habitan preferencialmente las primeras.

En las muestras analizadas de los núcleos de sedimento se observó un patrón común de los descriptores ecológicos de la comunidad de diatomeas desde el llenado de los embalses hasta la fecha, donde la mayor riqueza de especies, diversidad y equidad se da en las capas más antiguas del sedimento, mientras que, en las más recientes, es la dominancia de una o varias especies la que aumenta, indicando así el deterioro en la calidad del agua en los últimos años, en cada uno de los sistemas estudiados. Los efectos de la eutrofización, se reflejan en el aumento en la productividad del sistema y está muy cercanamente relacionada con la perdida de diversidad de los organismos acuáticos.

La alta abundancia y ocurrencia de diatomeas como *Spicaticribra Kingstonii* y *D. stelligera* en La Fe, de *Fragilaria familiaris* y *Discostella stelligera* en Riogrande II y de *A. granulata* en Porce II, en el sedimento superficial como en la zona más reciente del núcleo recuperado en cada sistema, fue un indicador del deterioro de la calidad para los dos primeros y el mantenimiento de ese estado para el caso de Porce II. En las muestras recuperadas en los núcleos de sedimento también se mantiene este comportamiento.

Se observó que entre los años 2000 al 2006 en embalse La Fe y a partir de 1999 al 2003 en el embalse Riogrande II, un importante aumento en la dominancia de la comunidad de diatomeas, con la consecuente reducción de la riqueza y equidad, mostrando el deterioro en la calidad del agua en estos sistemas.

Los tres embalses presentaron en el sedimento superficial NTK en menor concentración con relación al PT y una heterogeneidad espacial a distancias cortas de la distribución de MO, PT y NTK.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la investigación a través del convenio interinstitucional entre Universidad de Antioquia-Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín-Empresas Públicas de Medellín ESP, suscrito para estudiar la problemática ambiental para la gestión integrada y adecuada del recurso hídrico de los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II del departamento de Antioquia, entre el 2009 y 2016.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] López, M.P. Los sedimentos y su influencia en la eutrofización de los embalses. Caso del río Lozoya. Fundación para el fomento de la Ingeniería del agua, Vol. 16, No. 4. 2009.
- [2] Canedo-López, Y., Ruiz-Marín, A. & Chi-Ayil, J. C. Diagnóstico de la contaminación por metales pesados en sedimento superficial de la laguna de Términos, Campeche: una aproximación Estadística. REVISTA AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 7(2). 2014.
- [3] A.S.T.M. American Society of Testing and Materials (ASTM International, 7065 – 06). Standard Test Method for determination of Nonylphenol, Bisphenol A, p-tert-Octylphenol, Nonylphenol Monoethoxylate and Nonylphenol Diethoxylate in Environmental Waters by Gas Chromatography Mass Spectrometry. 2007.
- [4] LOI. DEAN, W. E. JR., J. Sedim. Petrol., Determination of Carbonate and Organic Matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. 242-248.44: 1974.
- [5] Method of Gravimeter. Soil Survey Staff. 1996. Total carbon, dry combustion, method. Soil Survey Laboratory methods manual. Soil Survey Investigations. Davies, B.E. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic Report No. 42, version 3.0. U.S. Gov. Print. Office, Washington, matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 38:150–151. DC. 1974.
- [6] APHA – AWWA – WEF. American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF), (APHA-AWWA-WEF). (2005), krd Methods for the Examination of Water and Wastewater. Maryland: Port City Press. 21 Edición. 2005.
- [7] EPA – 200.2. Method 200.2 Sample Preparation Procedure for Spectrochemical. Determination of Total Recoverable Elements. Martin, T.D. and E.R. Martin, "Evaluation of Method 200.2 Sample Preparation Procedure for Spectrochemical Analyses of Total Recoverable Elements", December U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Cincinnati, Ohio 45268. 1989.
- OSHA Safety and Health Standards, General Industry", (29 CFR 1910), Occupational Safety and Health Administration, OSHA 2206, revised January 1976.
- "Safety in Academic Chemistry Laboratories", American Chemical Society Publication, Committee on Chemical Safety, 3rd Edition, 1979.
- "Proposed OSHA Safety and Health Standards, Laboratories", Occupational Safety and Health Administration, Federal Register, Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.01. July 24, 1986.
- [8] Bolaños V. Potencial de liberación de Fe, Mn, Cr y Pb de los sedimentos de los embalses la Fe y Riogrande II, Antioquia, bajo condiciones de laboratorio. [Tesis de Maestría]. [Medellín (Colombia)]: Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. 2012.
- [9], Gallo, L.J. Reconstrucción del estado trófico de tres embalses colombianos a través de la relación entre la geoquímica por (NIRS) y las diatomeas presentes en el sedimento superficial y en núcleos de sedimento. Tesis de Doctorado. 2015.

