

Tasas de sedimentación y características de sedimentos de fondo en tres embalses de Antioquia, Colombia

Sedimentation rates and characteristics of bottom sediments in three reservoirs of Antioquia, Colombia

Flórez Molina, M.T.^{a,g}, Parra Sánchez, L.N.^{b,g}, Bolaños Benítez, S.V.^{c,g}, Gallo Sánchez, L.J.^{d,g}, Poveda Sáenz, A.^{e,g}, Agudelo Echavarría, D.M.^{f,g}

^aDepartamento de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Sede de Investigación Universitaria SIU, Carrera 53 No. 61-30, Torre II, Laboratorio 230. Medellín, Colombia. e-mail: maria.florez@udea.edu.co.

^bFacultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. e-mail: Inparra@unal.edu.co.

^cUniversidad de París. Francia. e-mail: vivi_1061@hotmail.com.

^dColegio Mayor de Antioquia, Colombia. e-mail: julianaga2003@yahoo.com.

^eUniversidad de La Salle, Colombia. e-mail: apsaenz@gmail.com.

^fUniversidad de Antioquia, Colombia. e-mail: diana.agudelo@gmail.com.

^gGrupo de Investigación en Gestión y Modelación ambiental. UdeA, GAIA

Recibido: 11/09/2017

Aceptado: 21/08/2018

Publicado: 31/10/2018

Citar como: Flórez Molina, M.T., Parra Sánchez, L.N., Bolaños Benítez, S.V., Gallo Sánchez, L.J., Poveda Sáenz, A., Agudelo Echavarría, D.M. 2018. Sedimentation rates and characteristics of bottom sediments in three reservoirs of Antioquia, Colombia. *Ingeniería del agua*, 22(4), 177-194. <https://doi.org/10.4995/la.2018.8001>

RESUMEN

La sedimentología de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín, localizados en Antioquia, Colombia, mostró tasas de sedimentación promedias elevadas. En Riogrande II de 2.25 m año⁻¹, en La Fe de 0.14 m año⁻¹ y en Porce II del orden de 7.6 m año⁻¹. En dichos embalses existen diferencias en la acumulación de sedimentos, los limos, se concentran en las zonas estancadas y más profundas mientras que las arenas en las entradas de los drenajes a los embalses. Existe una marcada tendencia estacional de la sedimentación con valores máximos durante los meses de lluvias y se observan diferencias composicionales y granulométricas espaciotemporales. Una simulación de la evolución sedimentaria de estos tres embalses indica su posible desaparición como depósito de agua de continuar los aportes de sedimentos desde los tributarios, siendo más drástica en Porce II.

Palabras clave | Tasas de sedimentación; sedimentos de fondo; embalses; Riogrande II; La Fe; Porce II; Antioquia; Colombia.

ABSTRACT

The sedimentology of three reservoirs of Empresas Públicas de Medellín, located in Antioquia, Colombia, showed high average sedimentation rates. In Riogrande II of 2.25 m year⁻¹, in La Fe of 0.14 m year⁻¹ and in Porce II of the order of 7.6 m year⁻¹. In these reservoirs there are differences in the accumulation of sediments, the silts are concentrated in the stagnant and deeper areas while the sands in the inlets of the drainages to the reservoirs. There is a marked seasonal tendency of sedimentation with maximum values during the rainy months and there are spatio-temporal compositional and granulometric differences. A simulation of the sedimentary evolution of these three reservoirs indicates their possible disappearance as a deposit of water to continue the contributions of sediments from the tributaries, being more drastic in Porce II.

Key words | Sedimentation rates; bottom sediments; reservoirs; Riogrande II; La Fe; Porce II; Antioquia; Colombia.

INTRODUCCIÓN

Los embalses son infraestructuras que suponen una clara discontinuidad en el gradiente longitudinal de procesos propios de los ríos; constituyen acumulaciones artificiales del agua con el fin de destinarla a los usos humanos (riego, hidroelectricidad, agua potable, recreación, etc.) así como para protección de población y de tierras contra inundaciones periódicas. Ellos «regulan» los aportes de materiales en suspensión y los arrastres de sólidos transportados por los ríos.

Son uno de los ecosistemas que reciben mayor atención por parte de la comunidad científica ya sea por su gran valor como recurso ecológico, por la variedad de ecosistemas existentes en todo el mundo o por la significancia que tienen por producir bienes y servicios a la humanidad. Además, son probablemente los ecosistemas acuáticos más complejos (Azevedo, 1988).

La posición geomorfológica de los embalses da lugar a tasas de retención de materia muy elevadas. Esto hace que, en sentido amplio, se les considere como sumideros de sedimentos y nutrientes (Phillips, 1989). Dichos sistemas acuáticos son ambientes deposicionales, originados y condicionados por los procesos que controlan la sedimentación (Richards, 1982). Estos procesos varían en función de las características físicas, químicas y biológicas del mismo sistema. Todos ellos tienen en común la importancia del componente biótico debido a la elevada productividad de estos ecosistemas (Wetzel, 1982), que genera grandes cantidades de restos orgánicos además de ejercer un control hidráulico del flujo de agua.

Son escasos los trabajos que aborden aspectos relacionados con la dinámica de la sedimentación (Johnston, 1991). La mayoría de los estudios integran a la sedimentación como parte del balance de materia (Howard, 1981), del ciclo de nutrientes (Mitsch y Reeder, 1991), como variable que condiciona el desarrollo de determinados organismos (Wardrop y Brooks, 1998), y como clave para diferenciar algunos aspectos del pasado (Bauman *et al.*, 1984).

La acumulación de sedimentos en los embalses depende principalmente de cuatro factores: hidrológicos (entradas fluviales y en algunos casos subterráneas, estabilidad de la lámina de agua, velocidad de la corriente, tiempos de retención del agua, flujos de inundación), morfométricos (batimetría, canales principales y secundarios, rugosidad del fondo, morfología externa, taludes, pendiente, islas, etc.), biológicos (vegetación dominante, disposición respecto al flujo principal, áreas que cubre, tipo de crecimiento, estacionalidad, biomasa, estado trófico), geoquímicos (aniones y cationes presentes en el agua, condiciones fisicoquímicas, materiales existentes en el área fuente, granulometría, transformaciones postdeposicionales, mineralizaciones) y de operación. En este sentido, las características que presentan los sedimentos que se están acumulando revelan el dominio de unos factores sobre otros (Jones y Bowser, 1978), es decir, la dinámica de la sedimentación, así como los efectos que la acumulación de materia tiene en la transformación y evolución del ecosistema.

De acuerdo a los datos reportados por Walling y Webb (1996), el promedio mundial de producción de sedimentos es de alrededor de 150 t/km² /año. Sin embargo, los diferentes mapas mundiales de producción de sedimentos que se han elaborado, muestran zonas alrededor del arco del Pacífico, los Himalayas y China, con producciones mayores a 1000 t/km². Los valores máximos reportados indican producciones específicas mayores a los 10000 t/km² /año, lo que conlleva, como lo reportan las estadísticas, a una pérdida anual de almacenamiento de entre el 0.5 y 1%, lo que viene a representar la astronómica suma de más de 50 km³/año.

El objetivo de este artículo fue hacer el análisis sedimentológico de los tres embalses en cuestión a partir de algunas de sus características como la distribución espacial del sedimento, su granulometría y las tasas de sedimentación en cada uno de ellos sin pretender establecer la comparación de los tres sistemas ya que, por sus particularidades como forma, clima, posición altitudinal, litología, tiempo de llenado, sus propias cuencas y su interés operativo, así como la dificultad de utilizar las mismas tecnologías y herramientas técnicas de evaluación a través del tiempo de su funcionamiento, impide el análisis comparativo de manera certera. Solo en las conclusiones se pone de manifiesto los datos más relevantes de cada embalse que acercan al conocimiento del objetivo buscado.

Este artículo hace parte de los resultados del Macro Proyecto “*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 a través de siete proyectos: Sedimentos; Procesos Físicos; Nutrientes; Limnología, Materia Orgánica; Contaminantes emergentes y Plaguicidas, realizado por las universidades de Antioquia y Nacional, sede Medellín y Empresas Públicas de Medellín,

entre los años 2009 y 2016. Dentro del macro proyecto fueron formados 37 estudiantes de doctorado, maestría, pregrado y jóvenes investigadores. Los autores del presente artículo hicieron parte del proyecto sedimentos coordinado por María Teresa Flórez M.

LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

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

El Embalse Riogrande II, se encuentra ubicado al Norte del departamento de Antioquia (Colombia) en jurisdicción de los municipios de Santa Rosa de Osos, Belmira, San Pedro, Entreríos y Don Matías y es alimentado por tres corrientes principales: los ríos Grande y Chico, y la quebrada Las Animas (Figura 1a). Este embalse es dedicado al aprovechamiento múltiple, generación de energía, mejoramiento ambiental y 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. El uso indiscriminado de los recursos naturales y el deterioro ambiental.

Embalse La Fe, se ubica en el Municipio de El Retiro, al Oriente del departamento de Antioquia - Colombia, (Figura 1b). Es un embalse de carácter múltiple, abastecimiento de agua potable, generación de energía 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 (esta última desemboca en la quebrada San Luis).

El embalse es el resultado de dos fases de construcción; la primera finalizada en 1967 y la segunda en 1974, estas hacen que el embalse se divida en dos cuencos Norte y Sur, separados por la anterior presa Los Salados construida en la primera fase, lo cual genera un estrechamiento que modifica el perfil altimétrico a través del thalweg del antiguo cauce.

Al Cuenco Norte, tributan los principales afluentes naturales y se encuentra la Torre de Captación, tiene un área de 0.68 km², es poco profundo (7.0 m a 18.2 m). El Cuenco Sur, sector de La Presa está caracterizado por recibir las aguas del bombeo del río Pantanillo, el embalse tiene un área 0.65 km², es un poco más profundo (14.7 m a 27.0 m). Este cuenco se caracteriza por ser una zona panda de alta deposición de sedimentos, debido a la entrada de los afluentes, la barrera que genera La Presa Los Salados y la aducción de la captación que reduce el transporte de sedimentos de los afluentes hacia La Presa (EPM, 2009).

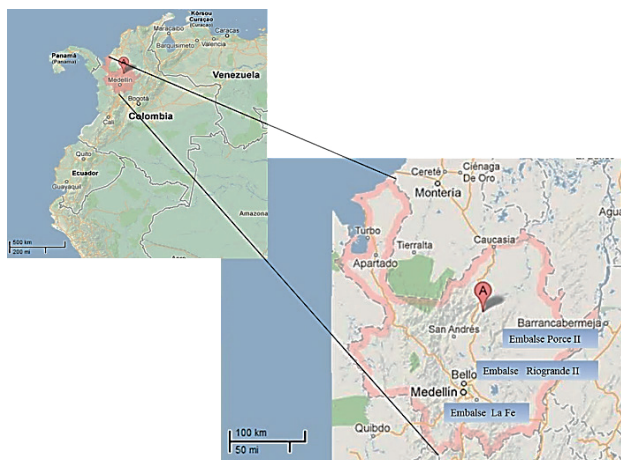
Embalse Porce II, se encuentra ubicada al Noroeste del departamento de Antioquia en jurisdicción de los municipios de Gómez Plata, Yolombó y Amalfi, (Figura 1c), a una distancia aproximada de 120 km de la ciudad de Medellín, por la carretera que de esta ciudad conduce a las poblaciones de Amalfi y Anorí. Este embalse solo es dedicado para producción de hidroenergía.

Este embalse está formado por dos ramales principales alargados, que se unen en un tercero limitado por La Presa. El primero, con cerca 3.3 km y orientado de Sur a Norte medidos 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 y en dirección Este-Oeste, tiene aproximadamente 5.7 km de longitud, 11.9 m de profundidad media y 1.5 km² de área. A partir de la confluencia de estos dos ramales, se origina el tercero o cuerpo principal en dirección Sureste-Noroeste con longitud cercana a 7.0 km, área de 5.6 km² y profundidad media de 34.8 m. La profundidad máxima del embalse (96.5 m) se encuentra en inmediaciones de 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.

La geología de los embalses Riogrande II y La Fe está constituida por rocas metamórficas del Complejo Polimetamórfico de la cordillera Central colombiana, las granodioritas del Batolito Antioqueño y la Dunita de Medellín, en menor extensión. Estas

unidades de roca están cubiertas con depósitos de vertiente no consolidados, depósitos de cenizas volcánicas y depósitos aluviales de las quebradas que drenan los embalses. El embalse Porce II transcurre por una cuenca de relieve montañoso, de drenajes normalmente cortos y subparalelos, con una litología relativamente homogénea (rocas metamórficas e ígneas), sobre la que se han desarrollado potentes perfiles de meteorización. El río se encaja coincidiendo con el cambio litológico desde la granodiorita a gneis anfibólico, en el sitio de La Presa afloran las rocas cornubianas y migmatíticas. Todas las rocas presentan un fuerte control estructural en el trazado del río, marcado por los cambios en la dirección y linealidad de algunos tramos.



Variable medida	1a. Riogrande II	1b. La Fe	1c. Porce II
Altura msnm	2200	2255	924
Área ha	1214	149	890
Volúmen Total hm ³	240.58	12.147	231
Volúmen Útil hm ³	138.96	12.147	231
Profundidad máxima m	47.2	27	96.5
Llenado/año	1989	1973-1985	1989
Tiempo retención/días	72,8	17,3 a 28	20
Rendimiento seguro m ³ /s	6	9.2	180
Vida útil estimada/años	50	50	50
Precipitación media mm/año	2250	3000	293
Máximo nivel operación msnm	2270	2155	924.50
Mínimo nivel operación msnm	2261	2146 msnm	900.40
Uso	Hydroenergía Agua potable Recreación	Hydroenergía Agua potable	Hydroenergía
Caudal medio m ³ /s/año	Río Grande 29 Río Chico 4.7 Q. Animas 1.1	Río Pantanillo 3.1 Q. Palmas y Espíritu Santo 1.4 Q. San Luis y Boquerón	Río Porce 115 Q. Cancana 3.15 Q. Guaduas

Figura 1 | Ubicación en el departamento de Antioquia Colombia, los embalses de interés.

DISTRIBUCIÓN DEL SEDIMENTO AL INTERIOR DE LOS EMBALSES

En la literatura especializada se han encontrado básicamente dos líneas para estimar la distribución del sedimento que se deposita al interior de un embalse en un periodo de tiempo. Una línea basada en la simulación numérica del proceso de sedimentación que emplea modelos en una, dos y tres dimensiones dependiendo de la complejidad y características específicas del embalse (o cadena de embalses), y otra que emplea métodos empíricos.

El método empírico de Área-Reducción fue desarrollado por el U.S. Bureau of Reclamation en el año de 1960 con base en medidas de 30 embalses con capacidades entre los 1.36 – 38547 hm³ con revisión posterior en 1962, los cuales consideran en su estructura que la distribución del sedimento al interior de un embalse depende de: 1) la operación del cuerpo de agua, 2) la textura y tamaño del sedimento, 3) la forma del embalse y 4) el volumen de sedimento depositado en el embalse. La desventaja de los métodos empíricos radica principalmente en su corto rango de aplicación, pues los mismos se ven restringidos a las condiciones en las cuales fueron recreados que, por lo general, son disimiles a las predominantes en los sitios en los cuales se desean aplicar.

Como alternativa para obviar las limitaciones de los métodos empíricos se ha desarrollado y difundido en gran medida el uso de modelos numéricos (matemáticos) basados en procesos, los cuales posibilitan tanto la reproducción de situaciones observadas en campo como la prueba de hipótesis sobre escenarios probables o extremos que no han sido medidos o que no han ocurrido aún en el embalse en estudio. Este hecho los convierte en una poderosa herramienta de apoyo tanto a la gestión como a la investigación teórica y aplicada.

Perea (2013), en el desarrollo de su tesis de maestría toma batimetrías realizadas en el embalse Porce II por EPM ESP en los años 2001, 2004 y 2007 y a través del análisis multiespacial determina como ha sido en el embalse el proceso de sedimentación y como ha avanzado el delta de sedimentos desde la entrada del río Porce, Figura 2. Dicho autor considera que lo erosionado en un periodo de tiempo entre el 2001 y el 2007 al interior del embalse debió ser depositado mayoritariamente dentro de él y anota que

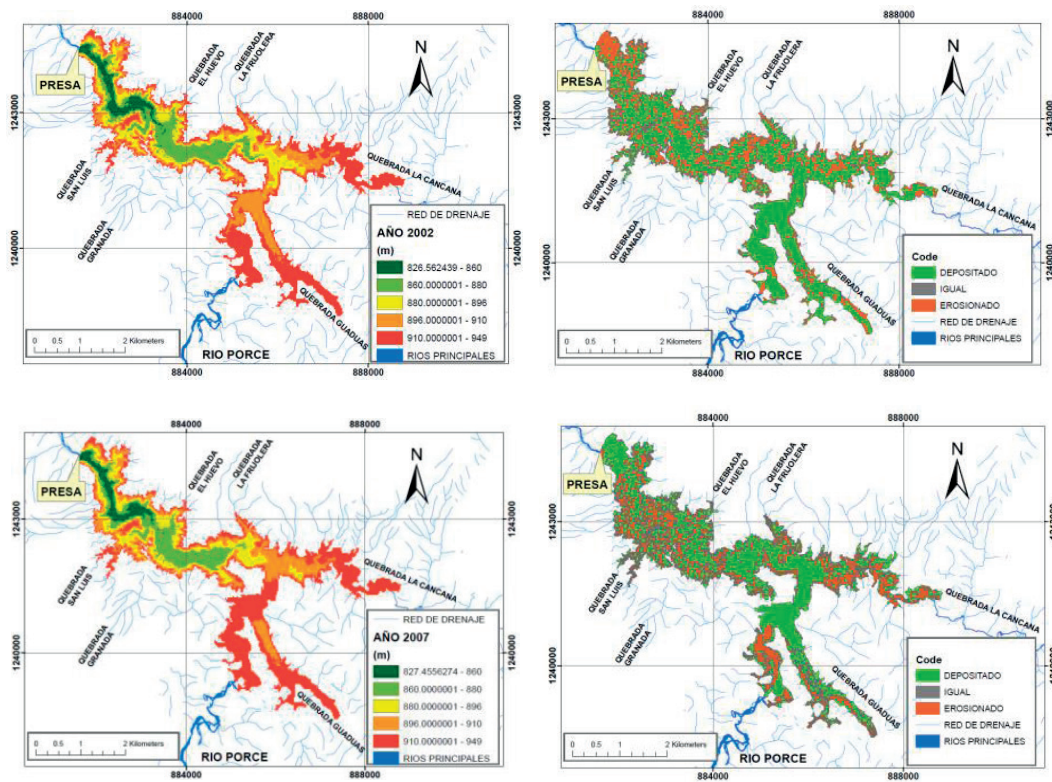


Figura 2 | Sedimentación registrada en el embalse Porce II durante el periodo 2001-2004 (imágenes superiores) y 2004-2007 (imágenes inferiores), procesadas por Perea (2013) con datos batimétricos tomados por EPM en los años 2001 y 2004.

el valor neto del volumen depositado por acción del sedimento que ingresó por tributarios (volumen depositado menos volumen erosionado) es similar durante el periodo 2001-2004, indica que la contribución del volumen neto depositado en los brazos del río Porce y de las quebradas Guaduas y Cancana es del orden del 17.8% del total, en el periodo 2001-2004 pero no expone mayor variación en el periodo 2004-2007.

De la Figura 2, se puede observar la cantidad de sedimentos que llegan al embalse desde el río Porce y la quebrada Guaduas, el cual no solo se deposita en dichos brazos, sino que avanza hasta la quebrada La Cancana al punto de estrangularla, esto pudo verificarse en el 2015 donde prácticamente los sedimentos laterales del borde izquierdo, aguas debajo de esta, han alcanzado hasta 3.50 m de altura y la han desconectado prácticamente del embalse. Se detallan zonas de deposición con claras diferencias entre lo reportado para el periodo 2001-2004 con respecto al periodo 2004-2007, en este último periodo se observan más zonas de erosión y por ende mayores zonas de acumulación de sedimentos. Llama la atención la fuerte erosión de los sedimentos en los brazos del Porce y de la quebrada La Cancana, así como en la zona totalmente léntica del embalse entre las Estaciones 8 y 12, con respecto a la imagen del primer periodo.

De acuerdo con el estudio realizado por la UdeA-Unal-EPM (2009-2016), se observó que en este embalse existen dos sectores en donde se registra una mayor sedimentación, uno es la estación E2 que coincide con la confluencia del río Porce y la quebrada Guaduas, el otro es después de la confluencia del río Porce y la quebrada Guaduas con la quebrada La Cancana, Figura 3. En el primer sector los depósitos de sedimentos son de hasta 25 metros mientras que en el segundo son de hasta 38 metros.

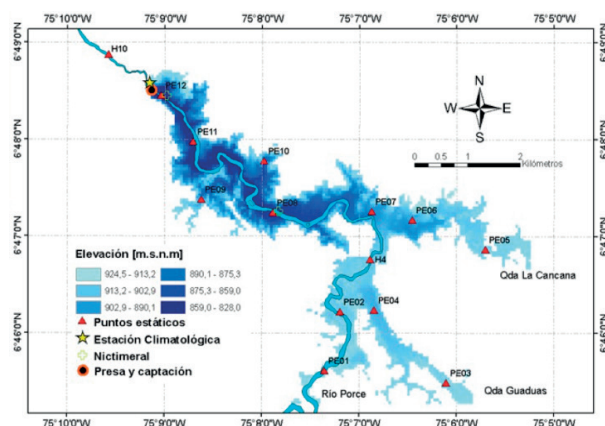


Figura 3 | Sedimentación registrada en el embalse Porce II, en las Estaciones E2 y E7.

En el embalse Porce II se pudo observar la formación de una pluma que llega hasta la estación E8, tal distribución aprovecha el tramo estrecho del río y de sus quebradas aportantes lo que permite la formación de barras laterales y deltas de torrentes. Si se compara esta información con los datos de Perea (2013) se puede ver que hay una coincidencia en la información la cual indica que durante el 2004 al 2007 se presentó la mayor sedimentación en el embalse, 22 metros en tres años –dato obtenido por batimetría en EPM, comunicación oral, Correa (2016)–, la cual se concentró preferencialmente en dichos sectores y coincidió con un evento Niña registrado en el país en el 2005 hecho con lo que se puede explicar esta súper producción de sedimentos; en el periodo 2002 al 2004 esta fue de 3 metros en dos años y, en el periodo 2007 al 2015 fue de 13 metros en ocho años.

Para los embalses Riogrande II y La Fe, se presentan los mapas batimétricos realizados por Franco (2011) y Román (2011), respectivamente, a partir de datos aportados por EPM ESP (2008). En la Figura 4, se puede observar que las áreas más profundas en cada uno de los embalses son relativamente pequeñas mientras que las zonas de deposición de sedimento van creciendo en el tiempo, en Riogrande II la zona donde más se acumula sedimentos es en la confluencia del río Grande con el río Chico cerca de la estación E3, el río Grande aporta más sedimentos al embalse que los demás drenajes incluido el río Chico, por este entra más carga de contaminantes. Para este embalse los aportes de sedimentos que hace con frecuencia la quebrada Don Diego son mucho más influyente que los sedimentos que entran por la quebrada Ánimas.

Para el caso del embalse La Fe, las mayores cargas de sedimentos finos entran por el bombeo del Pantanillo, en menor cantidad por las quebradas Palmas y Espíritu Santo, pero en este caso el sedimento es más grueso (desde tamaño limos hasta cantos de roca parcialmente redondeados) y en mucha menor proporción por San Luis y Boquerón. En la Figura 4, en los bordes del Cuenco Norte del embalse se observa una mayor acumulación de sedimentos y esto está relacionado con factores esencialmente morfológicos, el embalse es más pando en este cuenco y menos profundo (menos de 12 m), con la presencia de unidades habitacionales y vías localizadas en la periferia, y la entrada de sedimentos provenientes de las quebradas Palmas, Espíritu Santo, San Luis y Boquerón. En el Cuenco Sur, la profundidad es más alta (alcanza alrededor de 26 m, cerca de La Presa) y la mayor cantidad de sedimentos se acumulan muy cerca del punto de surgencia del bombeo tanto superficial como de fondo y al frente del bombeo en el borde del cuenco.

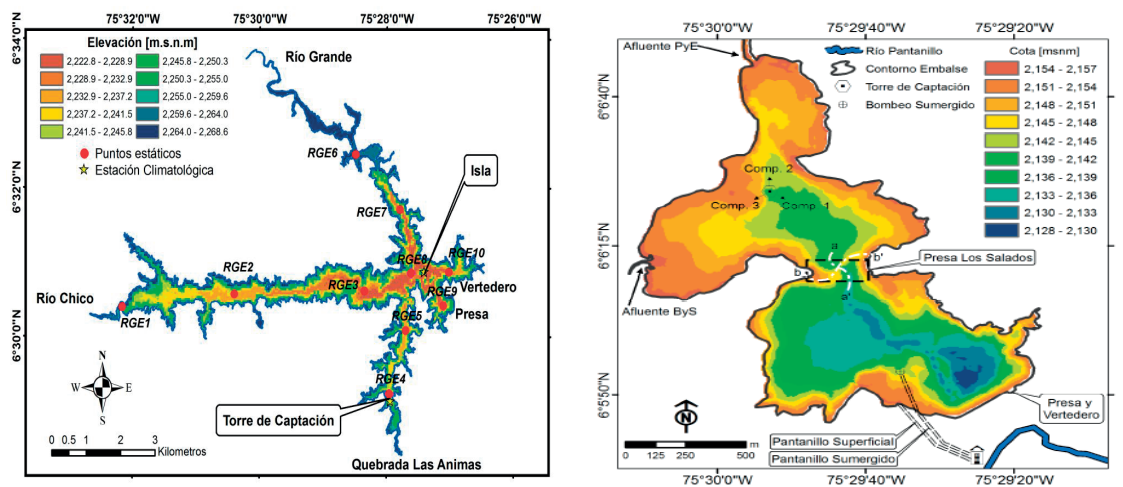


Figura 4 | Sedimentación registrada en los embalses Riogrande II (izquierda) y La Fe (derecha), mediante los datos batimétricos entregados por EPM ESP del 2008 y procesados por Franco (2011) para Riogrande II y por Román (2011) para La Fe.

MATERIALES Y MÉTODOS

Levantamiento de la información primaria

Tal como se indicó en la introducción, este artículo hace parte de los resultados del proyecto Sedimentos, enmarcado dentro del Maco Proyecto “*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 entre el 2009 y 2016.

Para todo el proyecto el levantamiento de la información primaria se efectuó entre marzo de 2010 y diciembre de 2012, en los tres embalses. Los datos obtenidos de estos muestreos y sus análisis, así como algunos resultados de las tesis de maestría y doctorado realizadas dentro del proyecto se han empleado en el desarrollo de este artículo, que hace parte de los compromisos pactados con las entidades participantes.

Para Riogrande II, se definieron 14 estaciones de muestreo, siete en La Fe y 12 en Porce II, entre estas, en cada embalse se seleccionaron tres estaciones que delimitaban un triángulo representativo de todas las estaciones en ellos las cuales se utilizaron para realizar análisis especiales de la información sedimentológica. Para el embalse Riogrande II los tres puntos se localizaron en las estaciones (E) cercanas a los brazos de la quebrada Animas (Estación 5), río Chico (Estación 2) y río Grande (Estación 7); en el embalse La Fe fueron 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, 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 muestras por triplicado de sedimentos con un nucleador de gravedad, recuperándose en cada uno entre 35 y 45 cm del sedimento superficial. Los núcleos fueron sellados con tapones y refrigerados para análisis sedimentológicos al centímetro para estudiar la estratigrafía de los sedimentos de fondo acumulados en los últimos tres años en los que se desarrolló la etapa de muestreo (2010 al 2012); definir el tamaño de la interfase agua-sedimento y de la capa bioactiva; la composición de diatomeas; establecer las relaciones de fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl y materia orgánica con grupos de diatomeas que pudieran dar evidencias de la calidad de los sedimentos del embalse y establecer a partir de estos datos el estado trófico de ellos.

En el laboratorio se abrieron por la mitad para su descripción estratigráfica y su tratamiento posterior (iguales determinaciones descritas en el párrafo anterior para los sedimentos, pero en este caso, se realizó al centímetro con el objeto de tener una referencia de alta resolución de estos sedimentos).

En cada punto, y con una draga Eckman, se obtuvieron 4 kg de sedimentos, estos fueron almacenados 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.

El análisis granulométrico de las fracciones gruesas y arenas se hizo mediante el método del tamizaje con tamices A.S.T.M., (2007), la determinación de limos y arcilla se realizó con el método de la pipeta.

Durante el periodo 2010 a 2012 se colocaron trampas de sedimentación cilíndricas (50×5 cm) por parejas, sumergidas en posición vertical a una profundidad de 0.20-0.50 m y por 45 días, para observar la dinámica temporal y espacial de la sedimentación. Las muestras recogidas en las trampas de sedimentos se analizaron posteriormente en el laboratorio para: materia inorgánica total, materia orgánica (pérdida por ignición a 550°C) y materia mineral.

Tanto en los sedimentos tomados con draga como en los recuperados a través de los núcleos se siguió la metodología presentada y aceptada para el Programa Marco, Proyecto Sedimentos (Florez *et al.*, (2017), en editorial).

Vida útil y sedimentación

De acuerdo con Brune (1953) y Churchill (1948), un parámetro básico para juzgar el problema de la sedimentación en embalses es la razón de almacenamiento Kt (capacidad/ingreso de sedimentos) lo que podría permitir mostrar la vida útil del embalse (Figura 5),

$$Kt=V/Ws$$

En donde, V es la capacidad total del embalse (m^3), y Ws es ingreso anual de sedimentos (m^3).

Con base en las batimetrías realizadas en los embalses por EPM en diferentes años previos al proyecto, los resultados de las tasas de sedimentación, lo obtenido en los núcleos de sedimentos, las observaciones de las columnas sedimentarias levantadas cuando los embalses habían bajado sus niveles por operación o por sequía, se estimó la producción unitaria de sedimentos según la ecuación indicada para obtener Kt (razón de almacenamiento).

Para Brune (1953) y Churchill (1948), los métodos empíricos, permiten estimar de forma aproximada la eficiencia de atrape de sedimentos a partir de ciertos datos básicos” (Tabla 1). “La eficiencia de atrape o retención es la “habilidad” de un embalse para

atrapar y retener sedimentos. Esta eficiencia depende del parámetro denominado índice de sedimentación, que se define como el tiempo promedio de retención dividido por la velocidad media en el embalse, de forma tal que el parámetro incorpora en alguna medida la forma del mismo.

$$I_{\text{SED}} = \bar{T}_{\text{RET}} / V_{\text{emb}}^{1/2}$$

En donde, I_{SED} Es el índice de sedimentación, \bar{T}_{RET} es el tiempo promedio de retención y, $V_{\text{emb}}^{1/2}$ es la velocidad media en el embalse.

Tasas de sedimentación

Las tasas de sedimentación fueron determinadas a partir de núcleos de sedimentos tomados en las tres estaciones en cada embalse, de los datos obtenidos de las trampas de sedimentación y de los datos proporcionados EPM mediante la batimetría realizada en los tres embalses entre el 2015 y 2016 (Correa, 2016, comunicación oral). Con el nucleador de gravedad se tomaron muestras de sedimentos verticales con lo que se obtuvo el espesor vertical de sedimento (L) que se ha depositado en cierto lapso de tiempo (D) y se estableció la relación L/D conocida como tasa neta de sedimentación que se expresa en cm/año o unidades equivalentes que es lo que aquí se nombra como tasas de sedimentación, en la Tabla 2, se referencian dichas tasas para cada uno de los tres puntos establecidos en los tres embalses considerados.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como puede verse en la Figura 5, la capacidad de ingreso de sedimentos, es mucho más alta en el embalse Porce II, que triplica en cantidad a Riogrande II y La Fe. Esto puede explicarse debido a que la cuenca del río Porce, principal afluente del embalse Porce II, no solo recoge las aguas del río Medellín que atraviesa toda el Área Metropolitana y por ende una significativa carga de sedimentos, sino que la mayoría de las cuencas que vierten sus aguas al embalse como Guaduas, La Cancana y La Frijolera, entre otras, hacen aportes de sedimentos igualmente significativos que contribuyen a aumentar dicha carga.

Para el caso del embalse Riogrande II, las cuencas que más contribuyen con entregar sedimentos al embalse son el río Grande y las quebradas Las Animas y Don Diego, mientras que el mayor aporte de contaminantes lo hace el río Chico. En el embalse La Fe, los valores de Kt son los más bajos, aunque no despreciables, estos son aportados en mayor cantidad por el bombeo del río Pantanillo y en menor cantidad por las quebradas Espíritu Santo y Palmas. Téngase en cuenta que estos dos últimos embalses son empleados para la producción de agua potable además de energía hidroeléctrica lo que significa la disposición de altos costos para la potabilización del agua.

Comparando estos datos con otros reportados a nivel internacional como es el caso de Costa Rica y República Dominicana, países tropicales con condiciones similares a las que presenta Colombia, los cuales están entre 1500 y 5000 m³/año, se podría indicar estos embalses se encuentran con una gran cantidad de sedimentos lo cual podría estar revelando que su colmatación es un proceso continuo que está en relación directa con la forma de sus cuencas tributarias y el deterioro ambiental de ellas tanto por actividades antrópicas como por procesos naturales debido al carácter torrencial que experimentan. De no tomarse medidas técnicas al respecto la vida media de ellos se reduciría ostensiblemente, en forma más rápida Porce II.

Utilizando el método propuesto por Churchill (1948), se hizo el ejercicio de calcular bajo ciertas condiciones de escorrentía, pendientes de los cursos y suponiendo diferentes valores de producción de sedimentos, el volumen requerido de los tres embalses que asegura al menos 50 años de vida antes de que se pierda el 50% de su volumen total, lo que podría denominarse vida media, Tabla 1.

Como puede verse en los resultados relacionados en la Tabla 1 el embalse Porce II es el que presenta un menor índice de sedimentación mientras que La Fe supera casi tres veces al embalse Riogrande II, lo que estaría indicando el alto dinamismo que presenta Porce II, tantos sedimentos entran al embalse como los que salen pese a que se alcanza a sedimentar también una alta

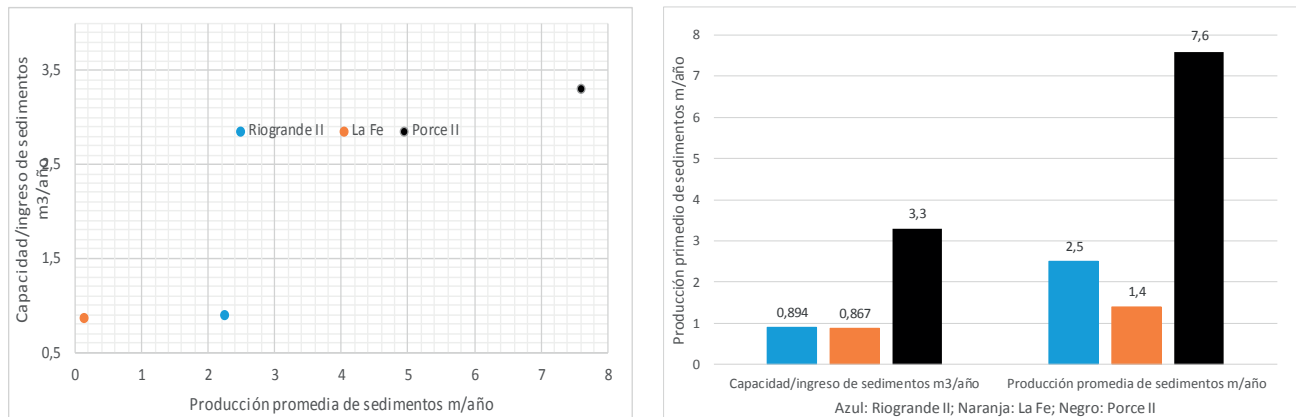


Figura 5 | Razón de almacenamiento de los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II.

cantidad de ellos, lo que prima en los sedimentos de este embalse son los tamaños finos entre limos y arcillas en las partes internas y limos y arenas en las colas mientras que en los dos otros embalses los sedimentos más dominantes son limo arenosos lo que corrobora que el tamaños del sedimento es influyente en la eficiencia de retención de ellos.

Para los tres embalses estudiados se puede concluir que pese a las cantidades de sedimentos que entran la capacidad de ellos es aún alta pero no despreciable lo que lleva a realizar medidas de mitigación aguas arriba de los drenajes principales, las cuales deben estar encaminadas a la retención de sedimentos antes de la llegada a los respectivos vasos.

Las tasas de sedimentación determinadas para los tres embalses (Tabla 2) asume implícitamente que los sedimentos se han acumulado continuamente y a un ritmo lineal, lo cual equivale a promediar las variaciones de escala pequeña, por ejemplo, aquellas que ocurren día a día en la sedimentación.

Tabla 1 | Datos básicos que permiten estimar la eficiencia de atrape de sedimentos para los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II, entre ellos el índice de sedimentación.

Parámetro	Riogrande II	La Fe	Porce II
V: Capacidad total del embalse m ³	1389.6×10 ⁵	1214.7×10 ⁴	23.1×10 ⁷
Ws: Carga anual de sedimentos m ³ /año	155,392	14006	394,270
Kt: Capacidad/ingreso de sedimentos m ³ /año	894.25	867.27	585.89
$I_{SED} = \bar{T}_{RET} / V_{emb}^{1/2}$: Índice de sedimentación	3.17	9.0	0.23
\bar{T}_{RET} : Tiempo promedio de retención días	72.8	22.5	20
$V_{emb}^{1/2}$: Velocidad media en el embalse m ³ /s/año	23.0	2.5	85.5
PUS: Producción unitaria de sedimentos m/año	2.5	1.4	7.6

Tabla 2 | Tasas de sedimentación calculadas en tres embalses de EPM ESP.

Embalse	Riogrande II			La Fe			Porce II		
	E2	E5	E7	E3	E4	E7	E2	E7	E12
Estaciones de Muestreo	E2	E5	E7	E3	E4	E7	E2	E7	E12
Tasas de Sedimentación m/año	0.08	0.14	6.52	1.5	0.9	1.7	8.9	10.5	3.5
Tasas de Sedimentación Promedia	2.5 m/año			1.4 m/año			7.6 m/año		

La mayor parte de los sedimentos de fondo de los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II son aportados por las crecidas de los ríos tributarios al vaso durante la estación lluviosa, lo cual subraya la importancia del manejo de las cuencas hidrográficas. Los tributarios mayores desarrollan deltas arenosos en las zonas de ingreso al embalse, mientras que la carga en suspensión llega al

fondo por caída libre como partículas libres y nieve lacustre. La carga disuelta se aprovecha como nutrientes por la biota del cuerpo de agua.

La velocidad del flujo del río disminuye con la distancia desde su punto de contacto con el cuerpo del embalse, lo que origina una sedimentación diferencial de cada tamaño de partícula. Otros factores como la floculación de los materiales más finos, las diferencias de densidad ocasionadas por la temperatura, o la cantidad de sedimentos afectan la velocidad de caída y de la capacidad del agua en retener sedimentos por lo que muchos sedimentos permanecen en suspensión por algún tiempo y forman una pluma parda aguas afuera del delta. Incluso después del área de la pluma, el flujo puede continuar por el embalse como un interflujo, dependiendo de las condiciones de estratificación del agua, por ejemplo, cuando el flujo de entrada de agua es más denso que toda el agua del embalse.

De acuerdo con Flórez *et al.* (2017) y con base en los resultados obtenidos (Tabla 1) muestran que las tasas de sedimentación son muy diferentes en los tres embalses y entre las estaciones de cada embalse la mayor parte del sedimento se transporta al embalse durante las avenidas, lo cual subraya la importancia del régimen hídrico de los drenajes y ha de tenerse en cuenta a la hora de elaborar posibles estrategias de prevención de aterramiento. Para los tres embalses los sedimentos superficiales recuperados muestran diferencias en las texturas, en el color, en el olor, en la composición y en el contenido de materia orgánica de los sedimentos tanto entre las estaciones como en los periodos de muestreo y estas están asociadas al periodo de sequedad (marzo y mayo del 2010) y al de lluvias (desde finales de mayo de 2010 hasta octubre del 2011).

En el embalse Riogrande II, existe un flujo principal condicionado por los aportes del río Grande, que rellena la zona situada aguas arriba de La Presa. El área de La Torre de Captación recibe aportes de agua tanto del río Grande como del río Chico y de la quebrada Las Animas. En el embalse La Fe, en el Cuenco Sur, la dominancia del flujo la ejerce el bombeo del Pantanillo que de acuerdo a la temperatura del agua y la época se introduce por debajo de la zona fótica mientras que, en el Cuenco Norte, los flujos más importantes provienen de las quebradas Palmas y Espíritu Santo que son absorbidas casi inmediatamente por la Torre de Captación. Para Porce II, el río Porce es quien ejerce la mayor dominancia de la corriente y en su recorrido incisa su cauce, atrapa los drenajes naturales y va hasta La Presa, llevando a su paso cantidades importantes de sedimentos y detritus, el agua del Porce es más fría y más densa, al aumentar el caudal, por lo que la pluma viaja a una mayor profundidad cuando el caudal aumenta.

Para el **embalse Riogrande II**, las tasas de sedimentación media para la entrada del río Chico al embalse fueron de 0.08 m/año, a la entrada al embalse de la quebrada Animas de 0.14 m/año y para la entrada del río Grande al embalse de 6.52 m/año (Correa, 2016, comunicación oral). La mayor tasa de aporte de sedimentos en las colas del embalse podría ser la respuesta a la mayor frecuencia de avenidas las cuales se registraron durante los periodos 1999-2001, 2007-2008 y 2010-2012.

La granulometría del sedimento mostró ligeras diferencias entre las estaciones de los tributarios y de la zona lentical, mientras en los tributarios predominaron las arenas –por lo general, las texturas fueron más gruesas y variables entre arenosas y arena limosas (A y AL)–, en la zona lentical predominan texturas más finas y aumentaron las proporciones de arcillas y limos –texturas arena limo arcillosas o limo arcillo arenosas (ALAr o LArA)–. La textura promedio del embalse fue arena limo arcilloso (ALAr) con una proporción del 57.8% de arenas, el 27% de limos y el 15.2% de arcillas, sin embargo, estas proporciones variaron ligeramente, a veces eran esencialmente arenosas, arena limosas y/o arcillo limo arenosas, o aumentaban localmente los contenidos de arcillas o limos.

Los colores de los sedimentos también 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, dicho olor muy 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 –inorgánicos (minerales), silicofósiles (diatomeas y fitolitos), orgánicos (polen, esporas, restos de plantas y animales) y mixtos (organominerales)–, indican la predominancia de inorgánicos en un 41.63% y 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 más silicofósiles y 31.75% de orgánicos más organominerales).

En los tres núcleos obtenidos en el embalse se ha estudiado la sedimentación más somera, últimos 40-50 centímetros depositados que equivalen aproximadamente a 2.6 meses de sedimentación para el embalse, con ellos se han definido dos macrofacies: 1. Limos (arenosos, grumosos, vesiculares y fibrosos) y, 2. Paleosuelos (limo arenosos o areno limosos), utilizando como criterios el tamaño de grano, el contenido de microcomponentes (minerales: cristalinos, opacos y de neoformación; silicofósiles como fitolitos y diatomeas; microcomponentes orgánicos como polen, esporas, hifas, zooclastos y fitoclastos, entre otros y, organominerales como resinas, grumos y coágulos); el contenido de materia orgánica, el color y las estructuras sedimentarias.

Para el **embalse La Fe**, las tasas de sedimentación media en la confluencia de las quebradas Palmas y Espíritu Santo es de 0.011 m/año, en la confluencia de las quebradas San Luis y Boquerón es de 0.0055 m/año y cerca de La Presa es de 0.02 m/año (Correa, 2016, comunicación oral). Estos valores indican que la tasa de sedimentación en la zona media del embalse fue muy reducida durante los primeros años de funcionamiento y registró un incremento en el tiempo durante los últimos 10 años. La ampliación del embalse y los cambios en el régimen de operación pudieron ser los principales factores desencadenantes.

La textura promedia del embalse durante los tres años de muestreo fue areno limo arcilloso (ALAr) en una proporción de 51.11% de arenas, 23.97% de limos y de 24.92% de arcillas, sin embargo, esta proporción varió ligeramente a través del tiempo y entre estaciones, por ejemplo, en las Estaciones 6 y 7 las texturas fueron predominantemente areno limo arcillosas (ALAr), en la Estación 1, fue arcillo limo arenoso (ArLA). En la Estación 12, que recibe las aguas del río Pantanillo, la textura varía entre arcillo limo arenoso (ArLA), limosa o limo arcillo arenosa (L/LArA) durante el 2010, 2011 y 2012, respectivamente. En la Estación 3, que coincide con la Torre de Captación y en la Estación 6 donde se ubica el Limnocorral (estación de control de EPM localizada en el 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 las Estaciones 8, 9, 10 y 11 donde se ubican las descargas de las quebradas Palmas, Espíritu Santo, San Luis y Boquerón, predominan las texturas areno gravillosas con gravas hasta de 10 o 15 cm de diámetro.

En la época seca dominaron las texturas arcillo areno limosas (ArAL) en marzo de 2010 y las areno arcillo limosas (AArL) en mayo de 2010; con las lluvias las texturas variaron a areno limo arcillosas (ALAr) en febrero, junio y octubre de 2011 y en enero de 2012; en junio de 2012 la textura dominante fue limo areno arcillosa (LAAr). En las estaciones localizadas en los tributarios (Estaciones 8, 9, 10 y 11) siempre dominaron granulometrías gruesas (arenas con gravas heterométricas y heterogéneas de hasta 10 cm de diámetro, subredondeadas y subangulosas).

Los colores de los sedimentos variaron entre pardo, pardo grisáceos y oliva (10YR4/3, pardo; 10YR3/3, pardo oscuro; 10YR4/2, pardo grisáceo; 5Y3/2, gris oliva oscuro; 10YR3/1, gris muy oscuro; 5Y4/3, oliva; etc.); el olor varió entre porqueriza, fósforo u óxido, dicho olor, al igual que en Riogrande II está muy relacionado con la temporalidad de muestreo y el color del sedimento.

Los datos promedios de los microcomponentes indican la dominancia de inorgánicos en un 53.13% y de silicofósiles en un 26.32%. En contraste, los orgánicos representaron solo el 9.49% y los organominerales el 11.06%. Estas proporciones al igual que los contenidos de materia orgánica inferiores al 13%, permiten calificar a los sedimentos del embalse como inorgánicos (inorgánicos más silicofósiles con el 79.45% del total de microcomponentes). Algo importante es que, pese a que los inorgánicos son los de mayor cantidad en los ocho muestreos, estos disminuyen en el tiempo, los silicofósiles se mantienen relativamente estables después de marzo de 2010 y los organominerales aumentan mientras que los orgánicos son más irregulares muy bajos en el 2010, un poco más altos en el 2011 y luego disminuyen nuevamente en el 2012.

Al Cuenco Norte le llegan las aguas de las quebradas Palmas y Espíritu Santo y transportan contaminantes y aguas negras de origen antrópico como descargas de viviendas y actividades silvopastoriles. Por el costado Noroeste recibe las aguas de las quebradas San Luis y Boquerón que también cargan material de origen antrópico. En este sector del embalse se encuentran las Estaciones 1, 2, 3 y 4, la Estación 4, solo recibe las aguas de San Luis y Boquerón.

En el Cuenco Sur la granulometría está íntimamente influenciada por el bombeo del río Pantanillo que trae una carga de sedimentos bastante importante debido a que aguas arriba existen actividades mineras especialmente de explotación de material de playa las cuales contribuyen enormemente al incremento de sedimentos que llegan por bombeo al embalse, los cuales, se pueden seguir a través de la pluma que deja el bombeo. Estas estaciones en promedio llegan a tener más arenas que limos y arcillas, durante los ocho muestreos.

En los tres núcleos obtenidos en el embalse se ha estudiado la sedimentación más somera, últimos 50 centímetros depositados que equivalen aproximadamente a 3.6 años de sedimentación para el embalse, con ellos se han definido tres macrofacies: 1. Arenas y arenas limosas; 2. Limos (arenosos, grumosos, vesiculares y fibrosos) y, 3. Arcillas. Estas macrofacies se definieron con los mismos criterios considerados para el Embalse Riogrande II.

Para el *embalse Porce II*, Para el embalse Porce II, las tasas medias de sedimentación alcanzaron 8.9 m/año en la estación E2 después de la entrada del río Porce al embalse; 10.5 m/año luego de la confluencia del río Porce con la quebrada Guaduas y La Cancana, estación E7 y, de 3.5 m/año en la estación E12 cerca de La Presa (Correa, 2016, comunicación oral).

Las granulometrías promedias fueron limo areno arcillosas (ALAr) con proporciones de 55.39% de arenas, 30.2% de limos y 14.41% de arcillas, condición que se mantuvo en los muestreos del 2010 y 2011, sin embargo, en el 2012 se registró una variación de las granulometrías dominando los limos, luego las arenas y, por último, las arcillas en una proporción de 50.26%; 35.96% y 13.78%, respectivamente. La textura de los sedimentos mostró que estos se distribuyen sin seguir un gradiente granulométrico determinado, sino que esta responde más a diversos eventos registrados en el embalse ya sea por la entrada de caudales anómalos y eventuales como producto de una creciente o porque la actividad hidráulica del río Porce erosiona y desplaza sedimentos a través de su cauce aún presente en el vaso del embalse.

Los colores de los sedimentos variaron entre gris oscuro, oliva o un pardo grisáceo oscuro o muy oscuro (5Y4/3 oliva; 5Y4/2, gris oscuro; 2.5Y4/2, pardo grisáceo oscuro o 2.5Y3/8 grisáceo muy oscuro); el olor varió entre porqueriza, fósforo u óxido, dicho olor está muy relacionado con la temporalidad de muestreo y el color del sedimento como en los dos embalses anteriores.

Los datos promedios de los microcomponentes 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).

En los tres núcleos obtenidos en el embalse se ha estudiado la sedimentación más somera, últimos 50 centímetros depositados que equivalen aproximadamente a 1 mes (0.8 meses) de sedimentación para el embalse, con ellos se han definido tres macrofacies: 1. Arenas y arenas limosas; 2. Limos (arenosos, arcillosos, grumosos, vesiculares y fibrosos) y, 3. Arcillas, dicho material tiene como característica su baja densidad, con valores inferiores a 1 g cm^{-3} en la mayoría de las zonas profundas y estancadas la densidad fue de 0.87 g cm^{-3} y en las zonas someras de 0.94 g cm^{-3} ; las densidades mayores se presentaron en los depósitos acumulados en las zonas de entrada de los drenajes naturales al embalse y en los canales la cual fue de 1.38 g cm^{-3} .

En los tres embalses el material depositado tiene como característica su baja densidad, con valores inferiores a 1 g cm^{-3} en la mayoría de las zonas. Las densidades mayores aparecieron en los depósitos acumulados en las zonas de entrada de los drenajes naturales las cuales variaron entre 1.34 g cm^{-3} para el embalse Riogrande II, 1.33 g cm^{-3} para el embalse La Fe y 1.38 g cm^{-3} para Porce II. En las zonas profundas y estancadas la densidad varió entre $0.82\text{-}0.80 \text{ g cm}^{-3}$ y 0.87 g cm^{-3} , respectivamente, mientras en las someras los valores fueron algo superiores a $0.92\text{-}0.91 \text{ g cm}^{-3}$ y 0.94 g cm^{-3} , respectivamente.

La materia orgánica promedia fue de 20.6% en La Fe, de 20.7% en Riogrande II y de 14.1% Porce II. El Fósforo Total en La Fe fue de 0,8%, en Riogrande II 0.16% y en Porce II de 0.9%. El Nitrógeno Total Kjeldahl en 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%.

DISCUSIÓN

Para los tres embalses los procesos fluviales de sedimentación se presentan esencialmente por problemas de erosión en las cuencas abastecedoras. La cantidad final de sedimentos que sale de las cuencas como carga de sedimentos, depende de la relación de los tres sub-procesos: desprendimiento, transporte y deposición. Dependiendo del grado de progreso de la erosión, el proceso puede ocurrir de varias formas (láminas, cárcavas, zanjas) que dependen de diversos factores entre los que se mencionan: características físicas del suelo (textura, estructura, permeabilidad, etc.), morfología del terreno (porcentaje y longitud de pendiente, barreras, etc.), clima (régimen de lluvia, intensidad y duración) y tipo de protección del suelo (cobertura vegetal, prácticas de protección, etc.). En

general, el sedimento se distribuye sin seguir un gradiente granulométrico; casi todo el sedimento de los embalses está constituido por partículas gruesas/muy finas. La presencia mayoritaria de partículas de arenas y limos indica niveles energéticos con alta capacidad de transporte. La distribución de tamaños de partículas en ellos presentó asimetría negativa, indicando que el sedimento se encuentra formado por una mezcla con dominancia de los materiales gruesos, relativamente bien seleccionados, de textura areno limosa preferencial y con muy bajas proporciones de arcillas. La heterogeneidad espacial de la sedimentación es similar pero su acumulación depende de la variabilidad topográfica del lecho hecho que condiciona la sedimentación.

Para el **embalse Riogrande II** la dinámica erosiva natural de las cuencas y las actividades humanas (la agricultura, la piscicultura y la ganadería) son de importancia fundamental con respecto al balance de sedimentos. De acuerdo con Gómez *et al.* (2017, en editorial), la contribución del volumen neto depositado en los brazos de los ríos Grande, Chico y de la quebrada Las Animas, es del orden del 39% del total entre el 2001 y el 2003, de 69% para el periodo 2003 y 2006, 0% desde 2006 hasta el 2008 (la depositación neta fue negativa en el lapso de tiempo 2008-2010), lo que indica que una gran porción de los nuevos depósitos se producen aguas debajo de la confluencia. Debido a que la mayor proporción del sedimento la aporta el río Grande. Esto puede indicar que al inicio de la operación del embalse el sedimento se depositó fluvialmente, agradando la zona entre la entrada del río Grande hasta la confluencia de la quebrada La Paja y sedimentando los cañones de los tributarios. Dado que la pendiente del depósito fluvial hacia aguas arriba (*topset*) tiende a estabilizarse en el tiempo, la sedimentación de los brazos se interrumpió y se incrementó el avance del delta hacia el interior del embalse. La cercanía del *foreset* a la confluencia y al bajo tiempo de residencia de la pluma en el brazo del río Grande, mucho sedimento fino puede ser transportado por la pluma del río Grande hasta la zona de La Presa y al final de los brazos del río Chico y de quebrada Las Ánimas.

Para este embalse la producción de sedimentos oscila bastante según las cuencas, p. ej., en la entrada río Chico (E2), la tasa de sedimentación es de 0.08 m/año, mientras que en la entrada del río Grande (E7) es de 6.52 m/año y en la entrada de la quebrada Las Ánimas (E5) de 1.7 m/año. A partir de estos datos, se estima que la producción de sedimentos en el embalse, puede cifrarse en torno a los 1.4 m/año, lo cual ocasiona a través del tiempo pérdida de capacidad en el embalse, ya que, a diferencia del material grueso, los finos llegan hasta el mismo muro y su sedimentación abarca toda la zona de aguas calmas; la formación de deltas; las corrientes de turbidez; la demanda bioquímica de oxígeno y el transporte de diversos contaminantes tales como metales pesados, bacterias, entre otros.

Para el **embalse La Fe**, tomando como referencia la batimetría realizada en el 2003 y a partir de la información hidrológica, se pudo establecer que, durante este año, se presentó un déficit de lluvias y de caudales en las cuencas del embalse, siendo los registros inferiores a los valores promedios históricos, aunque para el caso de los caudales a nivel mensual, el promedio histórico se superó durante algunos meses. Este comportamiento hidrológico se vio reflejado en la variación del nivel del embalse, ya que se registró descensos significativos del nivel del agua y se identificó un proceso de socavación de poca magnitud, en la zona de confluencia de la quebrada Las Palmas al embalse, pero en el cuerpo del embalse no se evidenciaron variaciones significativas y sólo se observó un pequeño depósito de sedimentos que se consideró como resultado del avance de los sedimentos arrastrados desde la cola del embalse.

Durante el periodo 2006-2012, se evidenció en la zona de la Torre de Captación que el nivel de sedimentos estaba en la cota 2142 msnm lo cual podría indicar que este nivel ha permanecido en unas cotas muy similares durante este periodo, por lo que se cree que continuará estabilizado en dicho valor ya que el flujo del agua hacia la captación impide que se presente sedimentación a niveles superiores.

En relación con la capacidad de almacenamiento, no se identificó una variación importante ni en la capacidad total ni en el volumen útil, lo cual es un reflejo del bajo aporte de sedimentos de las cuencas que drenan al embalse. El resultado obtenido para la capacidad total del embalse fue muy similar al del sondeo del 2000 aunque el volumen útil se redujo levemente ya que cambió de 11,787,685 m³ del año 2000 al valor actual de 11,716,262 m³. Este resultado implica una pérdida en la capacidad de almacenamiento del agua en el embalse de 71,423 m³ en los cuatro años lo que podría inferir una pérdida de la capacidad de 17,856 m³ por año. EPM SAS indica que el año 2004 correspondió a un año de aportes hídricos significativos, tanto a nivel de lluvias como de escorrentía superficial en las cuencas; para el resto del periodo de análisis (años 2005 y 2006), las condiciones hidrológicas fueron normales, con valores levemente superiores a los promedios históricos en las cuencas.

La comparación de los resultados del sondeo batimétrico realizado en noviembre de 2003 con el sondeo del 2006 indicó que durante este periodo de tres años se identificaron muy pocas variaciones en el trazado del fondo del embalse y no se encontraron depósitos superiores a 1 m.

En relación con la capacidad de almacenamiento, no se identificó una variación importante ni en la capacidad total ni en el volumen útil, lo cual es un reflejo del bajo aporte de sedimentos de las cuencas que drenan al embalse. La capacidad total de almacenamiento hasta la cota de vertimiento 2155.56 msnm fue de 13,986,051 m³. Téngase en cuenta que la capacidad instalada en el embalse era de 15 Mm³.

Para el embalse La Fe, la tasa de sedimentación oscila así: en La Torre de Captación (E3) que recoge las aguas provenientes de las quebradas Palmas, Espíritu Santo es de 1.5 m/año, mientras que en la entrada de las quebradas San Luis y Boquerón (E4) fue de 0.9 m/año y en la zona limnética a la cual entra el agua del bombeo del río Pantanillo (E7) la tasa es de 1.7 m/año. A partir de estos datos, se estima que la producción de sedimentos en el embalse, puede cifrarse en torno a los 1.4 m/año, lo cual ocasiona a través del tiempo pérdida de capacidad en el embalse, ya que, a diferencia del material grueso, los finos llegan hasta el mismo muro y su sedimentación abarca toda la zona de aguas calmas; la formación de deltas; las corrientes de turbidez; la demanda bioquímica de oxígeno y el transporte de diversos contaminantes tales como metales pesados, bacterias, entre otros.

Para el *embalse Porce II* y con base a Gómez *et al.* (2017, en editorial), entre el 2004 y el 2006 se evidenció removilización del material previamente depositado cerca de la entrada del río, seguramente por condiciones diferentes de nivel o de caudales al realizar ambas batimetrías. Se observó también el crecimiento del delta de sedimentos en la confluencia con la quebrada Guaduas y la confluencia con la quebrada Cancanas. El mismo proceso se encontró en los brazos de las quebradas Guaduas y La Cancana. En síntesis, los volúmenes de depósito entre las batimetrías de 2004 y 2006 alcanzaron 13.45 hm³ y los de erosión 96.58 hm³. Durante este periodo se forma un delta fluvial, identificándose con claridad el punto de inmersión o pivote, el “foreset”, el “topset” del delta y “bottomset” o depósito asociado a los sedimentos más finos aguas abajo del frente del delta hasta La Presa. En consecuencia, la mayoría de los sedimentos que ingresan al embalse (arenas, limos) se queda en el delta y solo la fracción más fina viaja hacia La Presa y forma depósitos menores. La pendiente del “topset” alcanzó 0.21% en el 2004 y 0.10% en el 2006, con cotas del punto de pivote de 913 msnm y 915 msnm, respectivamente y pendientes del frente del delta de 1.98% y 2.68%. En estas circunstancias, el punto de pivote fue el elemento que más cambió, desplazándose hacia La Presa aproximadamente 525 m entre los años 2004 y 2006 a una tasa aproximada de 168 m/año.

Para el embalse Porce II, la tasa de sedimentación oscila así: en la confluencia del río Porce con la quebrada La Cancana (E2) fue de 8.9 m/año y en la zona de confluencia de las quebradas La Cancana, Guaduas, La Frijolera y el río Porce (E7) fue de 10.5 m/año y en la zona limnética cerca de La Presa (E12) fue de 3.5 m/año. A partir de estos datos, se estima que la producción de sedimentos en el embalse, puede cifrarse en torno a los 7.6 m/año, lo cual ocasiona pérdida de capacidad en el embalse, principalmente. Para este embalse la producción de sedimentos, es un problema grave de colmatación que crea una alerta en la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua para la producción de hidroenergía.

CONCLUSIONES

La sedimentología de los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II pertenecientes a Empresas Públicas de Medellín, localizados en el departamento de Antioquia, mostraron tasas de sedimentación promedias muy elevadas, en Porce II del orden de 7.6 m año⁻¹, en Riogrande II de 2.25 m año⁻¹ y en La Fe de 0.14 m año⁻¹.

Muchos de estos sedimentos, sobre todo los gruesos se quedan en las llanuras aluviales y conforman verdaderos bancos que con el tiempo llegan a estabilizarse completamente, o son, de manera permanente, fuentes de sedimentos. Cuando entran las aguas de los drenajes al embalse la velocidad del flujo disminuye con la distancia desde su punto de contacto, lo que origina una sedimentación diferencial de cada tamaño de partícula; factores como la floculación, las diferencias de densidad ocasionadas por la temperatura, o la cantidad de sedimentos afectan la velocidad de caída y de la capacidad del agua en retener sedimentos por lo que muchos sedimentos permanecen en suspensión por algún tiempo y forman una pluma parda aguas afuera del delta (entrada del bombeo del río Pantanillo), incluso después del área de la pluma, el flujo puede continuar por el embalse como un interflujo,

dependiendo de las condiciones de estratificación del agua, por ejemplo, cuando el flujo de entrada de agua es más denso que toda el agua del embalse.

Se aprecian diferencias en la acumulación de sedimentos en estos sistemas en donde los limos, por lo general, laminados se concentran en las zonas estancadas mientras que las arenas son arrastradas por las corrientes de los drenajes que entran a los embalses.

Existe una marcada tendencia estacional de la sedimentación con valores máximos durante los meses de lluvias y se observan diferencias composicionales y granulométricas espaciotemporales. Una simulación de la evolución sedimentaria de estos tres embalses indica su posible desaparición como depósito de agua de continuar los aportes de sedimentos desde los tributarios, siendo más drástica para el embalse Porce II.

La sedimentación en estos embalses está más ligada al período de invierno registrándose una mayor acumulación de sedimentos gruesos a la entrada de los drenajes naturales la cual disminuye hacia la zona terminal del embalse tanto en tamaño de grano como en cantidad.

Las altas tasas de sedimentación pueden asociarse con las prácticas agrícolas, con una alteración hidrológica, principalmente en Riogrande II y La Fe, con una elevada escorrentía por actividades humanas en los tres embalses, con un insatisfactorio tratamiento de las aguas residuales de unidades domésticas vertidas en las cuencas, especialmente en Porce II y Riogrande II y con la pérdida de suelo por erosión en las zonas altas de estas, primariamente en La Fe y Riogrande II.

La sedimentación es un grave problema ambiental, por lo que debe ser incluida en las estrategias de manejo y control de este tipo de ecosistemas para evitar su desaparición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de esta investigación al convenio interinstitucional celebrado entre la Universidad de Antioquia-Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y Empresas Públicas de Medellín ESP, para “*El estudio de la problemática ambiental de los embalses La Fe, Riogrande II y Porce II, para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico*”, realizado entre el 2009 y 2016.

REFERENCIAS

- A.S.T.M. (2007). 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. American Society of Testing and Materials (ASTM International, 7065 – 06).
- APHA-AWWA-WEF. (2005). Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF). Maryland: Port City Press. 21 Edición.
- Azevedo, H. L. (1988). Study of heavy metal pollution in the tributary rivers of the Jacarepagua Lagoon, Rio de Janeiro State, Brazil, through sediment analysis. En: Seeliger, U., De Lacerda, L. D., Patchineelam, S. R. (editor). *Metals in Coastal Environments of Latin American*. Springer-Verlag. 297 pp.
- Bauman, R. H., Day Jr., J. W., Miller, C. A. (1984). Mississippi deltaic wetland survival: sedimentation versus coastal submergence. *Science*, 224(4653), 1093-1095. <https://doi.org/10.1126/science.224.4653.1093>
- Brune, G. M. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs, *Trans. AGU*, 34(3), 407-418. <https://doi.org/10.1029/TR034i003p00407>
- Correa P. L. (1916). EPM-ESP, encargada de las batimetrías y sedimentos de los embalses a cargo de la empresa. Comunicación oral.

- Churchill, M. A. (1948). Discussion of “Analysis and Use of Reservoir Sediment Data”, by L.C. Gollschalk, Procc of Federal Ingeragency Sedimentation Conference, USA.
- Dawson, F. H. (1981). The downstream transport of fine material and the organic matter balance for a section of a small chalk stream in southem England. 1. *Ecology*, 69: 367-380. <https://doi.org/10.2307/2259673>
- Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP). (2004). Batimetría embalse Riogrande II. Medellín. Información Inédita.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP). (2005). *Revista Hidrometeorológica*. 1(1). 1900-7248.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP). (2006). Batimetría embalse Riogrande II. Medellín. Información Inédita.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP). (2007). Batimetría embalse Porce II. Medellín. Información Inédita.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2008). Batimetría embalse La Fe. Medellín. Información Inédita.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP). (2009). Caracterización química de la materia orgánica en los embalses de La Fe y Riogrande II y su remoción en procesos de potabilización. Medellín. Información Inédita.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP). (2015). Batimetría embalses La Fe, Riogrande II y Porce II. Medellín. Información Inédita.
- Flórez Molina, M. T., Parra Sánchez, L. N., Bolaños Benítez, S. V., Gallo Sánchez, L. J., Poveda Sáenz, A., Agudelo Echavarría, D. M. (2017). Caracterización de los Sedimentos de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín, Colombia. *Revista Politécnica* 24, 49-63.
- Franco, J. D. (2011). Modelación de la estructura térmica de un embalse ramificado mediante el análisis de los procesos físicos gobernantes. Aplicación al embalse multipropósito Riogrande II. *Tesis de maestría en recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín*. 96 pp.
- Gómez, A. et al. (2017). Procesos físicos en los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II de Empresas Públicas de Medellín. Proyecto Embalses-EPM ESP-UdeA-Unalmed. En Editorial.
- Howard, R. F., Singer, M. J. (1981). Measuring forest soil bulk density using irregular hole, paraffin clod, and air permeability. *Forest Sci.*, 27(2), 316-322. <https://doi.org/10.1093/forestscience/27.2.316>
- Johnston, C. A. (1991). Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21(5-6), 491-565. <https://doi.org/10.1080/10643389109388425>
- Jones, B. F., Bowser, C. J. (1978). The mineralogy and related chemistry of lake sediments. En: *Lakes: chemistry, geology, physics* (A. Lerman, eds). New York: Springer Verlag, 179-235. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1152-3_7
- Mitsch, W. J., Reeder, B. C. (1991). Modelling nutrient retention of a freshwater coastal wetland: estimating the roles of primary productivity, sedimentation, resuspension and hydrology. *Ecological Modelling*, 54(3-4), 151-187. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90075-C](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90075-C)
- Perea, M. I. M. (2013). Modelación del delta de sedimento en un embalse que presenta rápidas fluctuaciones de nivel. *Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellin*. 116 P.
- Phillips, J. D. (1989). Fluvial sediment storage in wetlands. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 25(4), 867-873. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1989.tb05402.x>
- Richards, K. S. (1982). Rivers: form and process in alluvial channels. Methuen, London, Inglaterra.
- Román B. R. (2011). Caracterización Espacio Temporal de la Estructura Térmica de un Embalse Tropical poco Profundo, Abastecido Parcialmente por Bombeo. *Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellin*. 121 P.

Tan, B. L., Hawker, D. W., Müller, J. F., Tremblay, L. A., Chapman, H. F. (2008). Stir bar sorptive extraction and trace analysis of selected endocrine disruptors in water, biosolids and sludge samples by thermal desorption with gas chromatography–mass spectrometry. *Water Research*. 42(1-2), 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.032>

Walling, D.E., Webb, B.W. (1996). Erosion and Sediment Yield: a global overview. *Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996. IAHS Publication*. 236.

Wardrop, D. H., Brooks, R. P. (1998). The occurrence and impact of sedimentation in Central Pennsylvania wetlands. *Environmental Monitoring and Assessment*. 51(1-2), 119-130.

Wetzel, R. G. (1991). Land-water interfaces: metabolic and limnological regulators. *SIL Proceedings, 1922-2010*, 24(1), 6-24. <https://doi.org/10.1080/03680770.1989.11898687>