



Los Embalses

Porce II y Río Grande II

Radiografía de Nuestras Cuencas

Julie Arteaga Carrera*
Winston Cuellar Márquez**
Sandra Ríos Gallego***

Síntesis

El desarrollo de las actividades antrópicas en las cuencas del río Porce y Río Grande genera impactos significativos sobre la calidad del agua, lo cual incide en el ingreso de grandes cantidades de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, en los embalses Porce II y Riogrande II. No obstante, el mecanismo de autodepuración característico de estas represas permite el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico que emerge para el aprovechamiento de las comunidades asentadas aguas abajo. De esta manera, las represas disminuyen la huella ecológica de las comunidades ubicadas en la cuenca, aguas arriba, pero esta acción ocasiona una acumulación de nutrientes en el embalse, lo cual incide en su estado trófico, generando la consecuente proliferación de plantas acuáticas invasoras, como el buchón de agua y *blooms de algas*. Todo ello conlleva a la necesidad de implementar una gestión integral de las cuencas, mediante el desarrollo de acciones multidisciplinarias e interinstitucionales que permitan minimizar los impactos negativos generados por las actividades antrópicas.

Palabras claves

Calidad del agua, recursos hídricos, embalses, cuenca, actividades antrópicas, gestión integral, contaminación, nutrientes, estado trófico, eutrofización, plantas acuáticas, autodepuración, huella ecológica.

The Reservoirs: An X-Ray of Our Basins Case study: Reservoirs Porce II and Río Grande II

Abstract

The development of anthropic activities in the basins of the Porce and Río Grande rivers generates significant impacts on the water quality, as the introduction of great quantities of nutrients, specially nitrogen and phosphorus, in the reservoirs Porce II and Río Grande II. Nevertheless, the mechanism of self purification typical of these water sources allows the improvement of the water resource quality that comes from the reservoirs for the utilization of the settled communities downstream. Thus, these reservoirs diminish the communities' ecological footprint located in the basin upstream, but this action causes an accumulation of nutrients in the reservoir which affects in its trophic state, generating the pursuant proliferation of invading water plants, as water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and algal.

All this involve the need to implement an integral management of basins by means of the development of multi-disciplinary and interinstitutional actions that allow to maximize the negative impacts caused by the anthropic activities.

Key words

Water quality, water resources, reservoirs, basin, anthropic activities, integral management, pollution, nutrients, trophic state, eutrophication, water plants, self purification, ecological footprint.

* Ingeniera Biológica. Profesional Ambiental de la Subgerencia Ambiental de EPM. Medellín-Colombia. julie.arteaga@epm.com.co

** Magíster en Ingeniería. Profesional Ambiental de la Subgerencia Ambiental de EPM. Medellín-Colombia. winston.cuellar@epm.com.co

*** Especialista en Legislación Ambiental. Profesional Ambiental de la Subgerencia Ambiental de EPM. Medellín-Colombia. sandra.rios@epm.com.co

Introducción

En las últimas décadas, la calidad del agua se ha convertido en una de las variables más importantes en la gestión de los recursos hídricos. La modificación del decreto 1729 de 2002, donde se establecen lineamientos de gestión para el manejo y planificación de las cuencas hidrográficas, es una de las iniciativas legales que proponen y dictaminan acciones enfocadas a la prevención, control y evaluación de la calidad del recurso hídrico con una mirada, no sólo multi- e interdisciplinaria sino "transdisciplinaria"¹, que permita alcanzar un alto grado de coordinación y cooperación, así como lograr la unidad de determinados marcos conceptuales.

Empresas Públicas de Medellín (EPM) E.S.P cuenta con 10 embalses para la generación de energía y suministro de agua a las plantas de potabilización que abastecen la población del Valle de Aburrá. El metabolismo global de estos ambientes, así como el comportamiento espacial y temporal de las variables hidrológicas, químicas y biológicas que determinan su evolución y sostenibilidad, están profundamente afectados en su calidad y cantidad por las aguas provenientes de las cuencas aportantes de los embalses.

Los procesos de eutrofización de los embalses, en especial Porce II con condiciones de hipereutrofia y Río Grande II que avanza hacia la eutrofia, son un reflejo de la calidad del agua aportada por sus tributarios y, en especial, de las cargas de materia orgánica y de nutrientes causadas por las actividades antrópicas como el uso del suelo relacionado con las cuencas aportantes. Los resultados de los monitoreos de calidad del agua efectuados hasta el momento por EPM revelan que estos embalses se encuentran, en menor o mayor grado, en un proceso de deterioro progresivo como consecuencia del crecimiento urbano y de las actividades agrícolas e industriales en las áreas de influencia directa de las cuencas de drenaje.

Cuando se sobrepasa la capacidad de autorregulación de cada ecosistema acuático, éste desarrolla procesos que le permitan hacer frente a la avalancha de nuevos productos representados en altas cargas orgánicas, nutrientes y sustancias xenobióticas que ingresan, para los que no estaba preparado hasta entonces. Es así como la proliferación de macrófitas (plantas acuáticas) y *blooms de algas* son manifestaciones comunes en los embalses, los cuales, en la búsqueda de su autorregulación, desarrollan mecanismos de adaptación tendientes a conseguir el equilibrio de las partes que lo constituyen.

Este artículo pretende brindar una mirada actual y proyectada de las condiciones ambientales de los embalses Porce II y Río Grande II como consecuencia de la huella ecológica generada por las actividades antrópicas desarrolladas en las cuencas y mostrar las acciones realizadas para minimizar los impactos identificados.

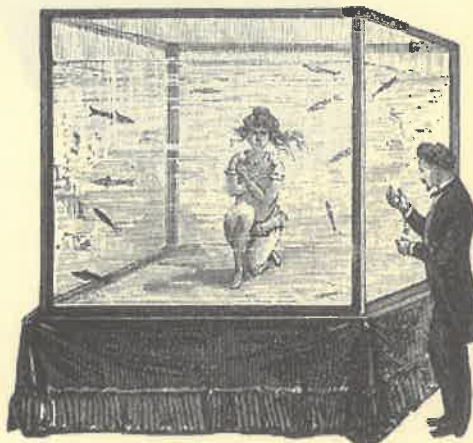


Estado ambiental de los embalses Porce II y Río Grande II

Embalse Porce II

La central hidroeléctrica Porce II está localizada al noreste del departamento de Antioquia, a una distancia de 120 km de Medellín. Tiene una capacidad efectiva de 405 MW, distribuidos en tres unidades generadoras que utilizan turbinas tipo *Francis* que descargan en total un caudal máximo de 204 m³/s al río Porce.

El embalse Porce II tiene un nivel de operación máximo de 924,5 msnm, una capacidad total de almacenamiento de 231,16 hm³, un espejo de agua de 890 ha y una cuenca de drenaje de 3.020 km² con un caudal promedio a la entrada del embalse de 118 m³/s. Este embalse funciona como vaso receptor del río Porce, su principal



afluente, que en sus primeros 98 km recibe el nombre de río Medellín hasta su confluencia con el río Grande. En su recorrido por los 10 municipios del Valle de Aburrá, el río recibe gran parte de las aguas residuales de origen doméstico e industrial, ricas en nutrientes, materia orgánica y sustancias inorgánicas, vertidas por una población de más de 3 millones de habitantes; además de todos los vertimientos del sector agropecuario, de las explotaciones mineras, rellenos sanitarios, mataderos, focos erosivos y monocultivos provenientes de las zonas que atraviesa.



Figura 1. Presa de Porce II.

Embalse Río Grande II

El embalse Río Grande II está ubicado en el altiplano norte, entre los municipios de Don Matías, Santa Rosa de Osos, Entreríos y San Pedro de los Milagros. Las casas de máquinas están ubicadas en los sectores conocidos como La Tasajera y Niquía que hacen parte de los municipios de Bello y Barbosa respectivamente. La primera genera 306 MW con una descarga hasta de 40 m³/s y la segunda, 19 MW. Vale la pena mencionar que este

embalse es de uso multipropósito, por lo que el agua que se capta para la central Niquía (hasta 6m³/s) abastece también la planta de potabilización Manantiales, perteneciente a EPM.

El embalse, con un volumen total 240,5 hm³ y un espejo de 1.214 ha, regula las aguas de los ríos Chico y Grande, con un caudal promedio a la entrada del embalse de 33,4 m³/s y una cuenca de drenaje de 1.041 km².

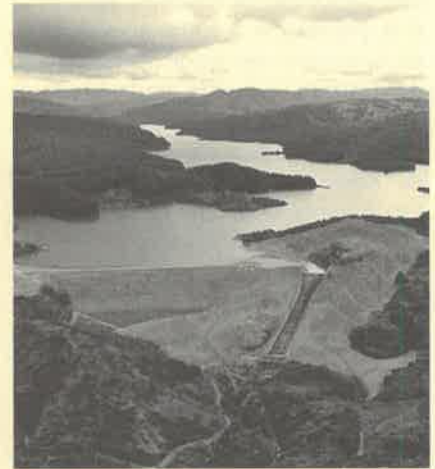


Figura 2. Presa de Riogrande II.

La eutrofización en los embalses Porce II y Río Grande II, como consecuencia de la Huella Ecológica

Según W. Rees y M. Wackernagel (1995), la Huella Ecológica HE, es definida como "el área, o territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistema acuático), requerida indefinidamente para generar los recursos necesarios y además para asimilar los residuos producidos por una población determinada de acuerdo a su modo de vida específico, donde sea que se encuentre esta área". En otras palabras, es un indicador biofísico del impacto de una población determinada, de acuerdo con su estilo de vida y la productividad de su espacio físico, dados por los consumos y la tecnología utilizada.



Por tanto, cuando una huella ecológica es alta implica mayor uso de los recursos como materia prima o como receptor de residuos. En este sentido, embalses como Río Grande II o Porce II están evidenciando gran parte de la huella ecológica de sus cuencas aportantes (figura 3) y, debido a las dinámicas presentes, se convierten en una medida del impacto que genera la población por el uso indiscriminado de los recursos y su disposición inadecuada. Este déficit ecológico presente en los embalses es resultado de la superación de su capacidad de carga. A nivel mundial, la eutrofización y contaminación de lagos, ríos y embalses con diversos contaminantes, han sido el principal problema en la gestión del recurso hídrico en las pasadas décadas (Koelmans et al; 2001). La eutrofización es el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos ocasionados por el enriquecimiento de nutrientes en ecosistemas acuáticos.

Existen dos tipos de eutrofización: natural y cultural. Aunque la eutrofización es un proceso que puede tener un origen natural de manera lenta, hoy en día es, fundamentalmente, de carácter cultural, es decir, completamente acelerado por el aporte de nutrientes de origen antropogénico, que genera fuertes cambios estructurales y funcionales en el ecosistema. La eutrofización cultural es resultado de los vertimientos o actividades agrícolas, urbanas e industriales. La aplicación indiscriminada de fertilizantes a nivel mundial alcanzó cerca de 10 millones de toneladas métricas de nitrógeno en 1950, 80 millones de toneladas métricas en 1990 y algunos autores estiman que se excedan las 135 toneladas métricas de nitrógeno para 2030 (Vitousek et al., 2007, citado por Smith et al., 1999). Las actividades urbanas también tienen fuertes

impactos en los flujos de nitrógeno y fósforo, debido a que, en la actualidad, sistemas lóticos como ríos y quebradas reciben y transportan todos los vertimientos de aguas residuales sin políticas de control suficientes que regulen estos nutrientes. El uso de detergentes a base de fósforo, la deforestación, el sobrepastoreo y la quema de combustibles fósiles, son otros ejemplos de la contribución antrópica al desequilibrio termodinámico existente en los sistemas lóticos. Así, en Sudamérica, cerca del 41% de los lagos sufre el problema de la eutrofización² y en Colombia, es uno de los problemas que enfrentan, de manera fuerte y preocupante, las empresas de servicios públicos, corporaciones autónomas y los sectores privados en los embalses, lagunas, lagos y ciénagas de todo el territorio nacional. En este sentido, en los embalses Porce II y Río Grande II, mediante caracterizaciones limnológicas realizadas desde el año 2005, se ha encontrado que sus principales tributarios llevan asociados una alta carga contaminante de nitrógeno y fósforo. La figura 4 muestra la carga contaminante promedio que está ingresando a los dos sistemas, con valores de 28,3 y 3,34 toneladas diarias de nitrógeno en los embalses Porce II y Río Grande II³, respectivamente; y 9,1 y 0,78 toneladas diarias de fósforo. Si se tiene en cuenta que en condiciones normales el aporte de fósforo de una cuenca sana es 1 kg/ha y que el área de la cuenca del río Porce es de 3.020 km² y de Río Grande, 1.041 km², se esperaría un aporte anual de 30.2 y 10.41 toneladas de fósforo para ambos embalse; realmente, lo que deberían recibir en un año, lo reciben entre 3 y 40 días (aprox.), situación crítica para ecosistemas lóticos como los embalses.

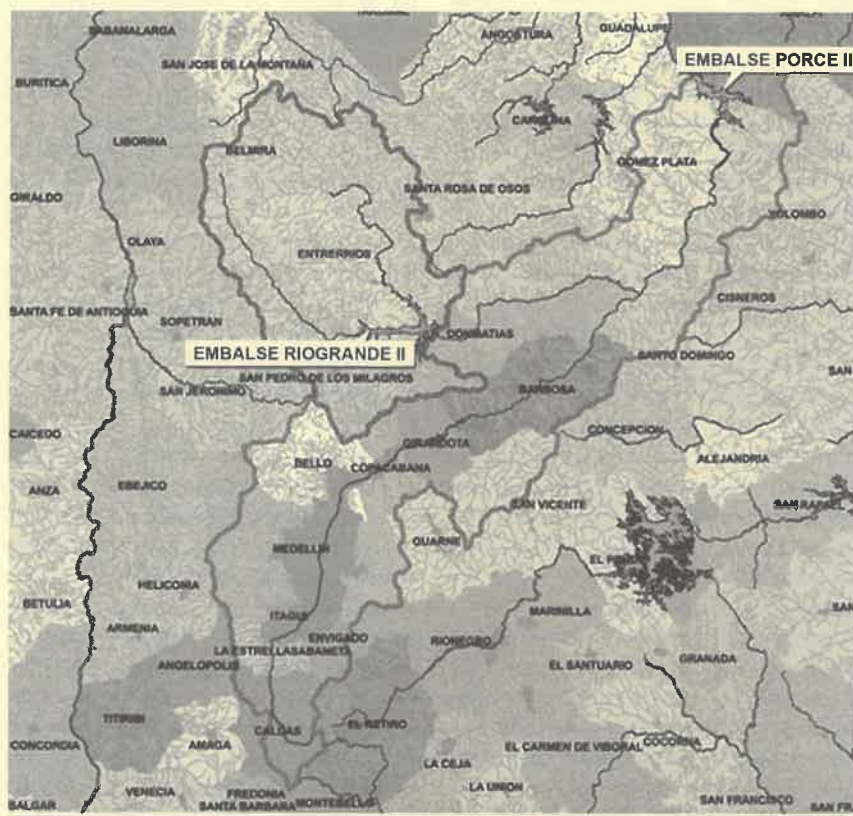


Figura 3. Cuencas de los embalses Porce II y Río Grande II

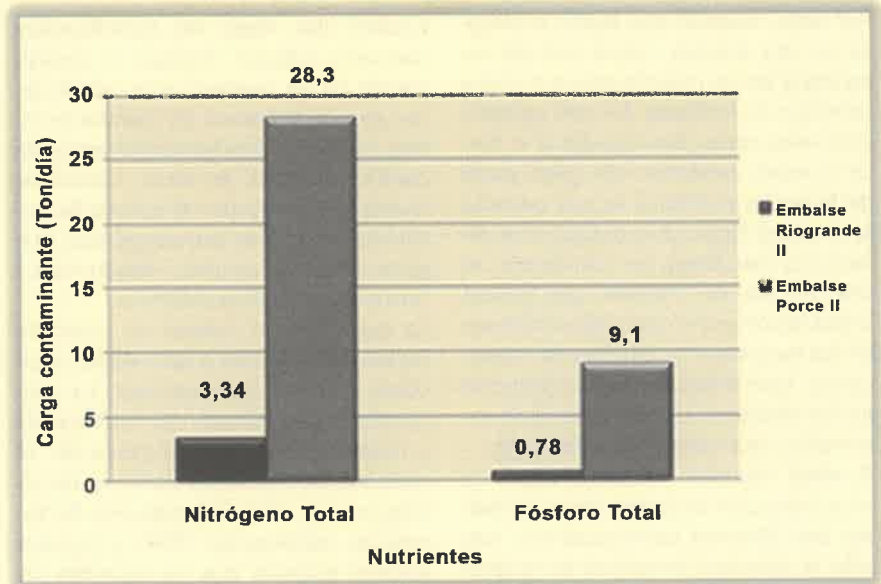


Figura 4. Carga contaminante de nitrógeno y fósforo que ingresa al embalse Porce II y Río Grande II.

Para la evaluación del estado trófico de los embalses Porce II y Río Grande II, que refleja la calidad del agua que reciben (especialmente la carga de materia orgánica y nutrientes), se utilizaron metodologías simplificadas para embalses cálidos tropicales como el modelo LACAT del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS (1981–1990) y el modificado Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson; estos métodos utilizan variables como el fósforo, nitrógeno, disco Secchi y clorofila *a*. Limnológicamente, los cuerpos de agua se pueden clasificar bajo esta metodología en: oligotróficos, sistemas acuáticos de bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima; eutróficos, con alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva; y mesotróficos, con características intermedias entre los dos descritos anteriormente. Al respecto, para el embalse Porce II, los resultados evidencian que este ecosistema presenta condiciones eutróficas con tendencia a la hipertrofia por la gran cantidad de nutrientes que le ingresan. En el caso del embalse Río Grande II, éste presenta una condición de mesotrofia que avanza

hacia la eutrofia por las diferentes actividades antrópicas y usos del suelo de la cuenca aportante.

La situación de enriquecimiento de nutrientes en estos embalses genera un crecimiento acelerado de algas y plantas acuáticas que, sin tener un mecanismo de control, pueden invadir en poco tiempo un espejo de agua. Específicamente en el embalse Porce II, en los últimos años se han tenido áreas hasta de 340 ha invadidas por *Eichhornia crassipes* (buchón de agua), lo que representa cerca de 1/3 del área total embalsada.

Igualmente, con el fin de dar cuenta del estado ambiental de los embalses, a partir de la evaluación de algunos parámetros físico-químicos medidos *in situ* y otros estimados en el laboratorio, EPM ha trabajado con un índice de Calidad del Agua desarrollado por la National Sanitation Foundation (NFS-WQI) en los Estados Unidos, que trabaja con 9 variables (oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno, nitratos, fosfatos, temperatura, turbiedad y sólidos totales). La estructura matemática de este índice está basada en



la sumatoria del producto obtenido de cada variable por su respectivo valor de peso asignado, lo que permite establecer la clasificación según lo descrito en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la fuente según el índice NFS-WQI

Valor del índice	Clasificación
0 - 25	Calidad muy mala
26 - 50	Calidad mala
51 - 70	Calidad media
71 - 90	Calidad buena
91 - 100	Calidad excelente

Los resultados del índice de calidad del agua NFS-WQI para los embalses Porce II y Río Grande II, entre los años 2007 y 2009 en la zona de entrada

del embalse, la torre de captación y el sitio de la descarga de la central, se presentan en la tabla 2:

Tabla 2. Índice de calidad del agua NFS-WQI para los embalses Porce II y Río Grande II. 2007-2009

Periodo	Embalse Porce II			Embalse Río Grande II		
	Entrada	Captación	Descarga	Entrada	Captación	Descarga
2007	57	80	79	71	75	77
2008	57	77	70	68	82	83
2009	60	78	72	71	76	79
Promedio	58	78	74	70	78	80

Los resultados presentan la diferencia de la calidad del agua en la entrada y salida de los embalses Porce II y Río Grande II. En este sentido, se considera que los embalses, a través de los procesos de descomposición de la materia orgánica y retención de nutrientes, van modificando la calidad del agua que reciben de forma progresiva a lo largo de su recorrido, actuando como sistemas de tratamiento natural. Bajo este planteamiento se empieza a entender por qué estos embalses presentan un estado trófico con un deterioro progresivo. En realidad, están realizando la depuración biológica que debería hacerse en las fuentes de contaminación, con el fin de no sobrepasar su capacidad de autodepuración.

Esta acumulación de nutrientes en los embalses origina la proliferación de plantas acuáticas invasivas como el buchón de agua, una de las macrófitas

acuáticas de más rápido crecimiento que se encuentra en el puesto 8 en el top 10 de las plantas más invasivas del mundo. De esta manera, las mismas estrategias de supervivencia y exitoso ciclo de vida que hacen que sea considerada una planta invasiva, la convierten en una de las mejores alternativas para sistemas de tratamiento de aguas y es considerada como materia prima para bioprocesos. Las plantas, por lo tanto, constituyen el centro del proceso (motor biogeoquímico), ya que degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también conforman una extensa superficie donde se



posibilita el crecimiento microbiano y se retienen los elementos sólidos en suspensión.



Figura 5. Proliferación de buchón de agua en el embalse Porce II.

Gestión integral de los embalses y sus cuencas

La experiencia por más de 9 años en el manejo del buchón de agua, los altos costos de inversión y la agudización de la problemática ambiental, han permitido replantear la gestión requerida para controlar esta planta, no como la suma de acciones puntuales en el cuerpo de agua, sino como una gestión integral que requiere una visión multidisciplinaria e interinstitucional a nivel de cuenca. Los embalses están resumiendo la problemática ambiental de los ríos y las cuencas que los abastecen y por lo tanto se deben generar estrategias de cuenca (solución a las causas del problema) y estrategias de embalse (solución a los efectos), que conduzcan al mejoramiento ambiental de los cuerpos de agua. Es por ello que EPM ha avanzado en la consolidación de propuestas y acciones para el manejo de la cuenca y los embalses.

Para lograr una gestión interdisciplinaria e interinstitucional caracterizada por un manejo ambiental integral de los embalses y sus cuencas, basado en un conocimiento detallado de sus procesos y de su dinámica, se requiere avanzar en el conocimiento de los procesos físicos, químicos y bióticos predominantes en estos sistemas, con el objeto de contar con los elementos

necesarios para garantizar una gestión adecuada bajo las consideraciones de interdependencia entre cantidad y calidad del agua, que permitan la sostenibilidad del recurso en el tiempo.

En concordancia, EPM realiza actividades de seguimiento y monitoreo de las diferentes variables de calidad del agua en los embalses y sus fuentes tributarias, y asume el mantenimiento, control y operación de éstos y de los predios de su propiedad que cumplen las funciones protectoras. Para el caso concreto del control y manejo de plantas invasoras (buchón de agua) en Porce II, se han implementado métodos de control físico que involucran barreras de confinamiento y extracción manual, además de métodos mecánicos con el empleo de maquinaria.

Como valor agregado a la gestión realizada para el manejo y control del buchón de agua, se evaluará el potencial de esta planta para su uso en la revegetalización de taludes y suelos degradados.

Respecto a la gestión de las cuencas, EPM ha liderado una estrategia de cooperación interinstitucional con autoridades ambientales como CO-RANTIOQUIA, CORNARE y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y con las administraciones municipales a través de la figura de convenio; estos acuerdos permiten disponer de recursos técnicos, físicos y financieros con el fin de implementar políticas y desarrollar planes y programas tendientes a la conservación y adecuado manejo de los recursos naturales, saneamiento básico y protección de las cuencas hidrográficas en las zonas de influencia de los embalses.

Resultados

Con el propósito de adelantar los estudios que permitan caracterizar ambientalmente, identificar e implementar acciones prioritarias de manejo ambiental en los embalses, EPM, la Universidad de Antioquia (U de A) y la Universidad Nacional de Colombia

(UNAL) están desarrollando desde el año 2009 el programa de investigación aplicada “*Estudio de la problemática ambiental de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico en los procesos de generación de energía y suministro de agua potable*”.

El programa está compuesto por 7 proyectos con temáticas diferentes, pero complementarias entre sí (procesos físicos, nutrientes, limnoecología, sedimentos, agroquímicos, sustancias húmicas y contaminantes emergentes). La articulación de estas temáticas a través de modelos conceptuales y matemáticos ajustados a las condiciones particulares de cada embalse, permitirá construir escenarios futuros dentro de unos rangos de confiabilidad aceptables, lo cual, a su vez, permitirá la formulación de acciones que contribuyan a la sostenibilidad del recurso y a una mayor viabilidad de los negocios, con estándares de calidad internacional.

Este programa será ejecutado en un plazo de 60 meses por los grupos de investigación: Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA), Grupo de Investigación en Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Grupo de Limnología Básica y Experimental (LIMNOBASE) y Química Orgánica en Productos Naturales, pertenecientes a la Universidad de Antioquia y el Grupo de Investigación Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (PARH), perteneciente a la Universidad Nacional sede Medellín, y desarrollado bajo la modalidad de 12 tesis de doctorado y 13 de maestría. Los resultados de esta investigación permitirán definir en el futuro las acciones de tipo integral que se deberán implementar a través de un plan de manejo de cada embalse y sus cuencas aportantes.

De igual manera, los avances relacionados con la gestión interinstitucional entre EPM y las autoridades ambientales a través de los convenios de

cooperación, han permitido priorizar diferentes estrategias, entre las cuales están:

- La intervención física con programas de saneamiento básico, control de erosión, protección de zonas de reserva hídrica y sostenibilidad ambiental de los sectores productivos, entre otros.
- La educación ambiental con el fortalecimiento de los Proyectos Ambientales Escolares – PRAE, y los Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental – PROCEDA, en las temáticas de interés y en las veredas de los municipios que hacen parte de las cuencas de los embalses.
- La comunicación con productos conjuntos en radio, televisión y material impreso para la sensibilización a las comunidades.
- La gestión de la información que permite el intercambio de información clave como la geográfica, los registros y resultados de monitoreo y demás estudios de interés para la gestión a nivel de cuenca.

Paralelo a este proyecto macro, se han realizado diferentes estudios investigativos enfocados al conocimiento funcional de las plantas acuáticas y de su acción como biofiltro para remover contaminantes del sistema⁵. Además, se tiene programada una investigación sobre el aprovechamiento del buchón de agua para restauración ecológica de zonas degradadas, que ejecutará la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional sede Bogotá.

El embalse Porce II, durante los años 2009-2010, fue monitoreado con base en parámetros físico-químicos y bióticos en agua, sedimento, peces y macrofitas, obteniendo una evidencia técnica y científica de que el uso indiscriminado de pesticidas, vertimientos de aguas residuales e industriales están dejando un rastro en la memoria del embalse.



Todas estas investigaciones, realizadas y en proceso, son la base fundamental para reorientar, continuar y proponer acciones eficaces y articuladas, destinadas a mejorar el estado ambiental de nuestros embalses.

Conclusiones

Los embalses son los colectores de eventos de lo que sucede en la cuenca de drenaje, lo cual repercute en la calidad del agua que contienen y en el consecuente estado trófico, que a su vez incide en la proliferación de plantas invasivas y *blooms de algas*.

Todo esto es el resultado directo de la carga orgánica y de nutrientes que reciben por la intervención antrópica, una huella ecológica de la comunidad asentada en la cuenca. No obstante, el mecanismo de funcionamiento de los embalses hace que éstos actúen como plantas de tratamiento, mejorando la calidad del agua que sale y sigue su curso en la cuenca, y disminuyendo por tanto la huella ecológica o impacto generado por la comunidad ubicada aguas arriba del embalse.

En las condiciones actuales, los embalses están realizando la función de plantas de tratamiento en las fuentes de agua que los abastece, muchas de las cuales no tienen planes de saneamiento a nivel urbano y rural. Los estudios sobre la evolución de la calidad del agua desde la cola hasta el sitio de presa en el embalse Porce II muestran que éste funciona como un reactor químico y biológico. Por este motivo, el estado ecológico de estos embalses tiende a la eutrofia o la hipereutrofia como consecuencia de los procesos de autodepuración que realizan.



El principal inconveniente de esta adaptación es que su estado trófico se modifica negativamente. Las comunidades de organismos se simplifican y se asemejan cada vez más a las que podemos encontrar en una planta de tratamiento y, por tanto, la calidad del agua disminuye. La incongruencia de todo este proceso es que, desde el punto de vista de la utilización del agua, queremos que los embalses, además de hacer la acción de auto-depuración, tengan agua de buena calidad para ser utilizada en otros procesos.

Pese a las condiciones actuales del estado trófico de los embalses Porce II y Riogrande II, esta situación es reversible; la restauración u oligotroficación de los embalses y el mejoramiento de la calidad del agua que contienen son posibles a través de la implementación de planes de saneamiento y de un adecuado manejo y gestión a nivel de cuencas, con la participación de los diferentes actores presentes en el territorio.

Por lo anteriormente expuesto, la investigación aplicada constituye una herramienta muy importante para EPM, pues le permite ver la gestión integral de los embalses con base en un conocimiento detallado de los procesos físicos, químicos y bióticos en el agua, y del estado ambiental de las cuencas. Esto permitirá un trabajo interdisciplinario e interinstitucional con las autoridades ambientales, las administraciones municipales, las comunidades y el sector productivo, que garantice la sostenibilidad de los recursos en el tiempo.

Bibliografía

ACUÑA, I. *Huella Ecológica y Biocapacidad: Indicadores Biofísicos para la Gestión Ambiental. El caso de Manizales, Colombia.* [en línea] <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=374> [Consultado en Noviembre de 2010]

ARMENGOL, J. *Análisis y valoración de los embalses como ecosistemas.* Departamento de Ecología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona. 2005.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN (EPM) E.S.P. *Informes de desarrollo de actividades de seguimiento y monitoreo ambiental de las centrales hidroeléctricas Porce II y Riogrande II.* Medellín. 2001-2008.

EPM E.S.P. *Análisis del comportamiento de la calidad del agua en los embalses de generación de energía de EPM y sus fuentes tributarias.* Medellín. 2007.

EPM E.S.P., UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL) SEDE MEDELLÍN. *Formulación de un modelo de crecimiento y desarrollo, basado en variables ecofisiológicas para el manejo integrado del buchón de agua (Eichhornia crassipes SOLMS) en ecosistemas acuáticos lénticos.* Medellín. 2009

EPM E.S.P., UNAL SEDE BOGOTÁ. *Proyecto de investigación para determinar la viabilidad del uso del buchón de agua (Eichhornia crassipes) en actividades de revegetalización y restauración ecológica.* Medellín. 2010

EPM E.S.P., UNAL SEDE MEDELLÍN, UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA (U. de A.). *Protocolo marco del programa de embalses "Estudio de la problemática ambiental de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico en los procesos de generación de energía y suministro de agua potable".* Medellín. 2008.

KOELMANS A, HEIJDE A, KNIJFF L & AALDERINK R. *Integrated modeling of eutrophication and organic contaminant fate & effects in aquatic ecosystems. A review.* En: *Wat Res.* Vol. 35, No. 15. 2001. pp. 3517-3536.

ROLDAN, G y RAMIREZ, J. *Fundamentos de limnología neotropical,* Ed. Universidad de Antioquia. Medellín. 2ª Edición. 2008

SMITH V; TILMAN G; NEKOLA J. *Eutrophication: impacts of excess nutrient nputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems.* En: *Environmental Pollution* (100). 1999. pp 179-196.

Notas

- 1 La transdisciplinariedad comprende una familia de métodos para relacionar el conocimiento científico, la experiencia extra-científica y la práctica de la resolución de problemas. La investigación transdisciplinar se orienta hacia los aspectos del mundo real, más que a aquellos que tienen origen y relevancia sólo en el debate científico. Una cuestión de mayor importancia en la investigación transdisciplinar es hasta que punto se consigue la integración de las distintas perspectivas científicas.
- 2 Enriquecimiento de nutrientes en aguas superficiales
- 3 M.C.Tedezco. *Algas en agua de consumo: acción humana y falta de manejo.* Universidad Nacional del Sur. Disponible en: <http://infouniversidades.siu.edu.ar/noticia.php?id=441>. Consultado el 1 de enero de 2009.
- 4 Datos obtenidos con promedios semestrales hasta el año 2009.
- 5 Estudio adelantado por el Grupo de Manejo integrado de Macrofitas de la Universidad Nacional, Sede Medellín.