


EVOLUCIÓN EN LA CARGA DE NUTRIENTES DE RÍOS DE MONTAÑA QUE FLUYEN A UN EMBALSE, CUENCA MEDIA DEL RÍO MAGDALENA

 CARLOS AUGUSTO BENJUMEA HOYOS¹
CLAUDIA LUCÍA BEDOYA CASTAÑO²
DEICY ANDREA ÁLVAREZ ALZATE³

RESUMEN

El enriquecimiento de nutrientes en ecosistemas acuáticos se da por múltiples factores naturales y antrópicos; la acumulación de estos en los cuerpos de agua puede traer consecuencias en la calidad del recurso y teniendo en cuenta que la información en términos de nutrientes en ecosistemas acuáticos tropicales, específicamente en Colombia es limitada, es importante realizar investigaciones orientadas hacia la conservación y manejo adecuado del recurso hídrico. En este contexto se realizó un estudio de los cambios espaciales y temporales de las cargas de nutrientes al embalse Amaní (cuenca media del río Magdalena, Colombia), considerando las transferencias de agua entre cuencas, desde el río Guarinó hacia el río La Miel. Se implementaron además modelos simples de eutrofización como método comparativo entre momentos, es decir, antes y después de la puesta en operación del trasvase y así conocer el estado trófico del embalse Amaní.

PALABRAS CLAVES: nitrógeno; fósforo; nutrientes; embalse; trasvase.

NUTRIENTS LOAD EVOLUTION OF HIGH MOUNTAIN RIVERS FLOWING INTO A RESERVOIR, MAGDALENA RIVER MID - BASIN

ABSTRACT


Nutrients enrichment in aquatic ecosystems is given by multiple natural and human factors. Their accumulation in water bodies can lead to undesired consequences on the water quality. Considering that information of nutrients in tropical aquatic ecosystems, specifically in Colombia, is limited, it is important to carry out research projects aiming at conservation and proper management of water resources. In this context, a study of the spatial and temporal changes in nutrient loadings into the Amaní reservoir (Magdalena River mid-basin, Colombia) was carried out considering inter-basins water transfers from Guarinó river to La Miel river. In order to compare the trophic status in the reservoir before and after transfer operations have started, simple eutrophication models were implemented.

KEYWORDS: Nitrogen; Phosphorus; Nutrients; Reservoir; Transfer.

¹ Ingeniero sanitario. M.Sc. Ingeniería, Universidad de Antioquia. Docente Investigador, Grupo de Investigación en Limnología y Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Oriente. Rionegro, Colombia.

² Ingeniera ambiental, Universidad Católica de Oriente. Rionegro, Colombia.

³ Ingeniera ambiental, Universidad Católica de Oriente. Rionegro, Colombia.

 *Autor de correspondencia: Benjumea-Hoyos, C.A. (Carlos Augusto).* Universidad Católica de Oriente: Sector 3 Carrera 46 No. 40B - 50, Rionegro (Antioquia, Colombia). Tel: (574) 569 90 90 Ext. 285 - 532
Correo electrónico: cbenjumea@uco.edu.co

Historia del artículo:
Artículo recibido: 10-VI-2013 / Aprobado: 11-VII-2014
Disponible online: 30 de diciembre de 2014
Discusión abierta hasta diciembre de 2015

EVOLUCAO NA CARGA DE NUTRIENTES DE RIOS DE MONTANHA QUE FLUEM A UM RESERVATORIO NA BACIA DO RIO MAGDALENA

RESUMO

O enriquecimento de nutrientes em ecossistemas aquáticos é dado por muitos fatores naturais e antrópicos; o acúmulo destes corpos d'água pode ter consequências sobre a qualidade do recurso e considerando a informação em termos de nutrientes em ecossistemas aquáticos tropicais, especificamente na Colômbia é limitado, é importante a realização de pesquisas para promover a conservação e o manejo adequado dos recursos hídricos. Em este contexto foi realizado um estudo das alterações espaciais e temporais em cargas de nutrientes para o reservatório Amani (bacia média do rio Magdalena, Colômbia), considerando as transferências entre as bacias desde o rio Guarinó para o rio La Miel. Se implementaram modelos simples de eutrofização como um método comparativo entre os momentos, ou seja, antes e após do início da operação de transferência e, assim, saber o estado trófico do reservatório Amani.

PALAVRAS-CHAVE: Nitrogênio; Fósforo; Nutrientes; Reservatório; Transferência.

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de contrarrestar los efectos negativos de la escasez de agua, se han propuesto obras hidráulicas como posible solución, específicamente los trasvases entre cuencas; estos se han proyectado y ejecutado con el fin de incrementar los recursos hídricos disponibles y solucionar los problemas de déficit hídrico (Cornare, 2007).

Las transferencias de agua entre cuencas con diferencias químicas, físicas y biológicas pueden alterar la dinámica del ecosistema receptor con posibles efectos en la calidad del agua. Además, una carga excesiva de nitrógeno y fósforo a menudo tiene como resultado la eutrofización, afectando la salud física y la integridad biológica de los sistemas fluviales, con causas indeseables como floraciones algales, reducción en la transparencia del agua, procesos anaerobios que generan olor y sabor y aumento del costo en los tratamientos de agua. Por ello, se hace necesaria la aplicación de estrategias de gestión que permitan la identificación de problemas en cuanto a la cantidad y calidad del recurso intervenido (Fornarelli y Antenucci, 2011). Los focos de contaminación pueden ser puntuales o difusos y estar asociados fuertemente a los patrones estacionales de las precipitaciones (Siyue-Li, *et al.*, 2008).

En Colombia es poca la información disponible acerca de los trasvases, pero se sabe que el departamento de Antioquia posee una cadena de embalses con obras hidráulicas de transferencia de agua para la generación de energía, pero para la época de construcción la legislación ambiental era deficiente, por lo cual esta situación es poco documentada; caso específico es el embalse La Fe donde uno de sus afluentes, el río Pantanillo, importa agua de los ríos Buey y Piedras (Román, 2011). Otros casos particulares son las transferencias de agua en la cadena de embalses de las centrales hidroeléctricas San Carlos y Troneras, así como el trasvase Guarinó, que lleva aguas del río de ese mismo nombre hacia el río La Miel en el Oriente del departamento de Caldas - Colombia, proyecto hidráulico objeto de este estudio, construido con el fin de aumentar la capacidad hidroeléctrica de la central Miel I. Sin embargo, debido a la extracción de agua de una cuenca a otra, se pueden generar variaciones químicas no solo en la cuenca donante (Guarinó) sino también en la cuenca receptora (La Miel), y en este caso en particular cuando el agua fluye al embalse Amani donde se ubica la central Miel I. A raíz de ello, surge entonces la necesidad de adelantar estudios e investigaciones para hidroeléctricas y así determinar los cambios temporales y espaciales en la carga de nutrientes, porque si se conoce el origen del conflicto

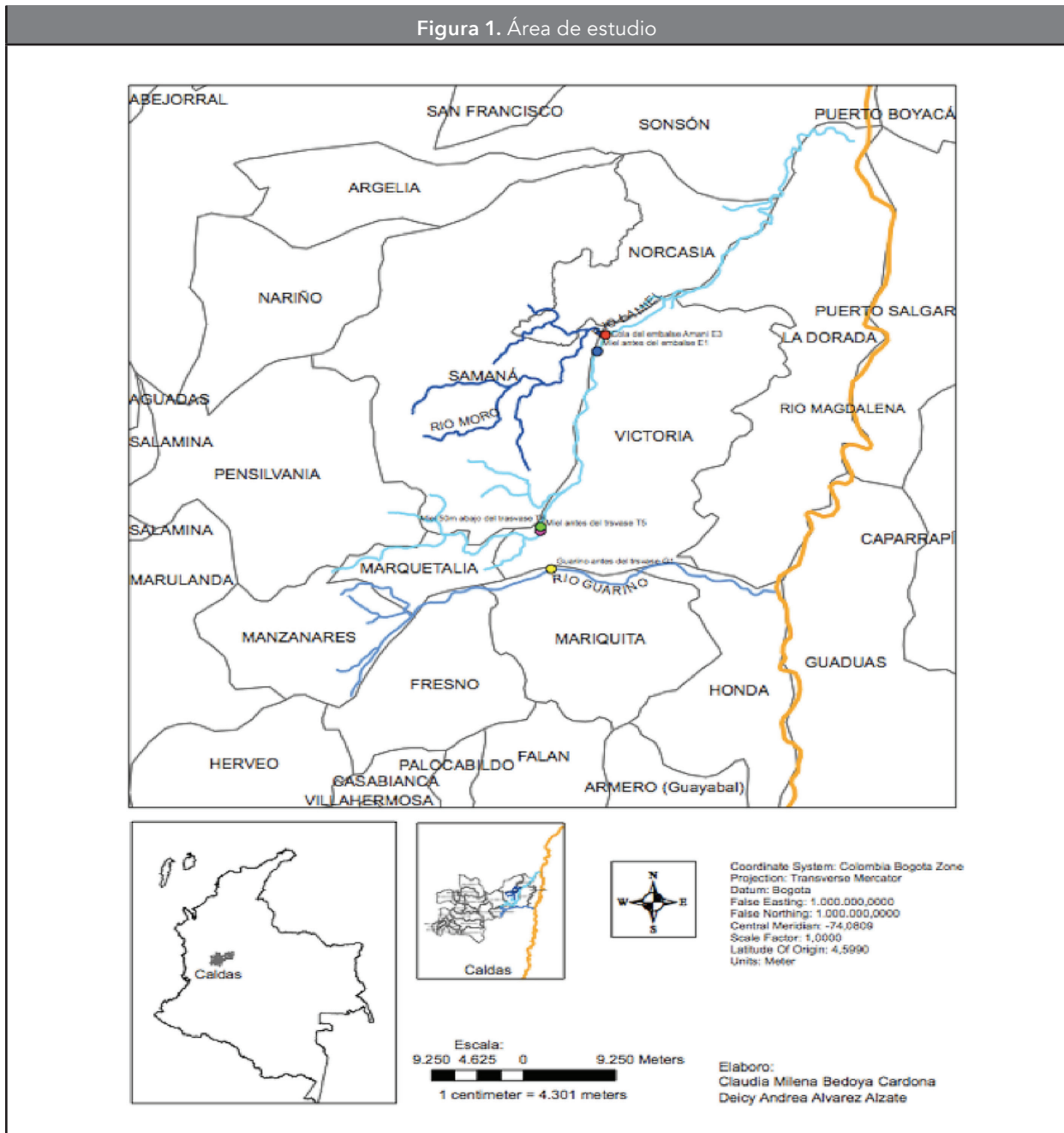
pueden plantearse propuestas más acertadas para su manejo y mitigación. Este trabajo es el resultado de la información obtenida a la luz del convenio académico Isagen – Universidad Católica de Oriente. La información y resultados aquí descritos son propiedad intelectual de ambas instituciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El proyecto denominado trasvase Guarínó se encuentra localizado en el departamento de Caldas,

Figura 1. Área de estudio



Fuente: elaboración propia

en límites con el departamento del Tolima, sobre la vertiente Oriental de la Cordillera Central, en su cuenca media baja a la altura del municipio de Victoria, como se muestra en la **Figura 1** (Isagen, 2011). Parte del caudal del río Guarinó se trasvasa y tiene su descarga sobre el río La Miel, específicamente en la parte alta del río, en el municipio de Manzanares Caldas, es decir, aguas arriba del embalse Amaní, zona donde se lleva a cabo el estudio.

Diseño del muestreo

Para determinar los principales cambios de nutrientes en el río La Miel y en el embalse Amaní se establecen dos momentos: el momento 1 desde febrero de 2009 hasta agosto de 2010 y el momento 2 desde octubre de 2010 hasta abril de 2012, es decir, antes y después de la operación del trasvase. Para determinar los principales cambios temporales y estacionales en la carga de nutrientes en el río La Miel y en el embalse Amaní, con la puesta en operación del trasvase del río Guarinó, se tiene en cuenta la toma de muestras en cinco estaciones ubicadas en los ríos con influencia directa del trasvase y del embalse (ver **Tabla 1**), en períodos de aguas altas, bajas y su respectiva transición, en campañas bimensuales, dos por época climática, entre los años 2009 y 2012. Una de las estaciones se localiza en el río Guarinó y las cuatro restantes en el río La Miel. De estas estaciones, tres se localizan en el ecosistema lótico y una en el ecosistema léntico. Se tienen en cuenta diferentes parámetros fisicoquímicos, entre ellos las diferentes formas de nitrógeno y fósforo, variables en función de las cuales se realiza el estudio, además de algunas variables *in situ*, tales como oxígeno disuelto, temperatura, pH, conductividad, así como registros de sólidos suspendidos totales (SST) y caudales. Se emplea, además, una base de datos suministrada por Isagen, y los métodos analíticos utilizados por el laboratorio del Centro de Investigaciones Ambientales de la Universidad de Antioquia se basaron en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20 edición, 1998.

Los resultados obtenidos fueron tratados mediante un análisis descriptivo e inferencial, en los cuales se determinan estadísticos de tendencia central y dispersión como la media aritmética, los valores máximos y mínimos, y el coeficiente de variación. De igual forma,

se desarrollaron análisis de varianza no paramétricos (Kruskal-Wallis) con el objetivo de establecer diferencias estadísticamente significativas de las variables con respecto a los sistemas, sitios de muestreo y los momentos hidrológicos. El tratamiento de la información se lleva a cabo en el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.

Con el objetivo de reducir la dimensionalidad y eliminar la correlación entre las variables ambientales con respecto a los sistemas estudiados, se realiza un análisis de componentes principales (ACP) que incluye las estaciones y períodos de muestreo. Previo a este abordaje, las variables son estandarizadas ($(x-\text{min})/(\text{max}-\text{min})$). Este análisis se ejecuta en el programa CANOCO 4.5. Para la estación ubicada en la cola del embalse se utilizan modelos simples de eutrofización; los modelos seleccionados son VbLacat 1.2 (Molina, *et al.*, 2004) y el índice de estado trófico de Aizaki, 1981.

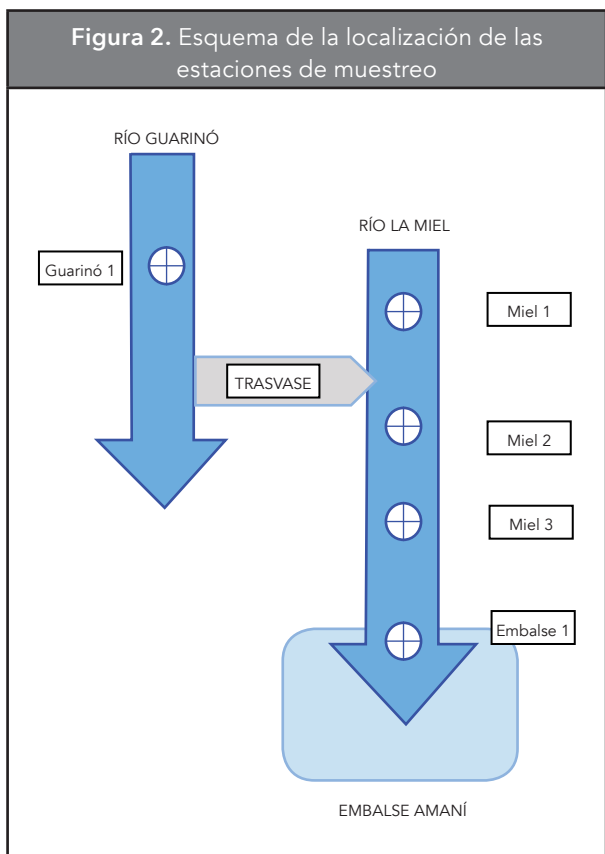
Estos procedimientos se hacen con el fin de determinar la evolución en la carga de nutrientes en estos ecosistemas antes y después de la operación del trasvase.

En la **Tabla 1** se presentan las estaciones de muestreo con su respectiva nomenclatura y ubicación; la **Tabla 2** presenta las variables y los factores de estudios tenidos en cuenta para los análisis.

Tabla 1. Estaciones de muestreo

Estación	Nombre
Guarinó1	Río Guarinó 50 m antes de trasvase y Quebrada Canán
Miel 1	Río La Miel antes del trasvase
Miel 2	Río La Miel 50 m después del trasvase
Miel 3	Río La Miel antes del embalse Amaní
Embalse 1	Cola del embalse río La Miel Amaní

Fuente: elaboración propia



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Variación espacial y temporal de caudales

La variación de caudales está fuertemente asociada al período hidrológico y al momento, es decir, antes y después de la operación del trasvase, como se muestra en la **Figura 3**.

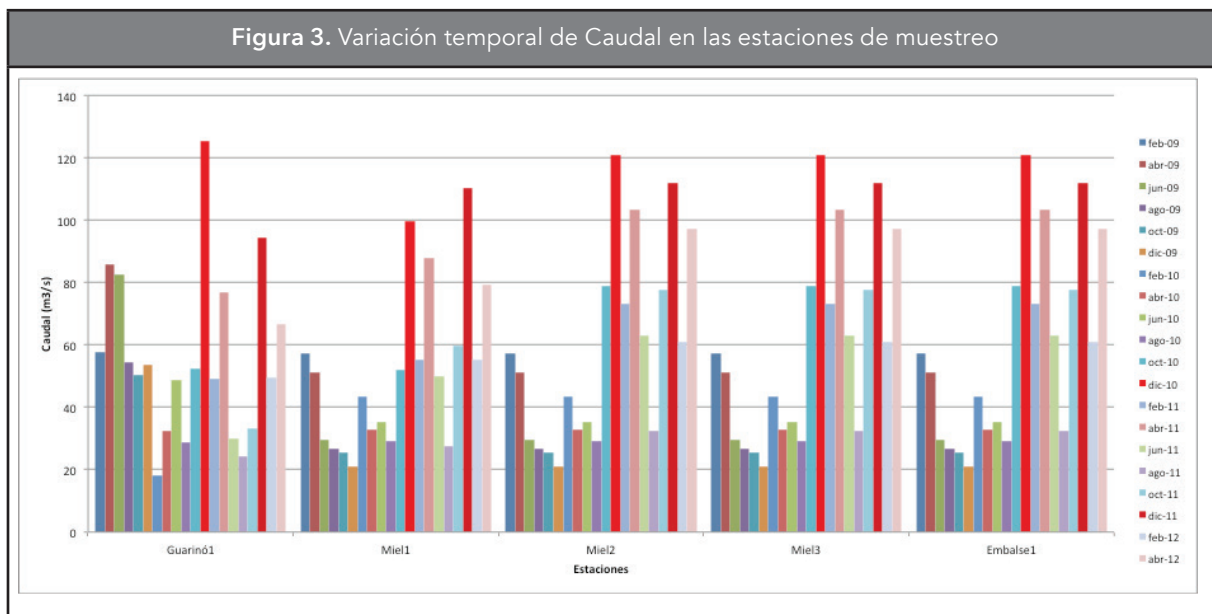
Para Guarinó 1 durante el año 2009 los caudales variaron entre 50 y 85 m³/s; los valores mínimos corresponden a la fase cálida del ENSO (*El Niño Southern Oscillation*; este ciclo global tiene dos extremos: una fase cálida conocida como El Niño y una fase fría, conocida como La Niña), pero su efecto no fue tan marcado como en febrero y abril de 2010. En el mes de febrero de 2010 se presentó un caudal mínimo con un valor de 18 m³/s, período que corresponde al fenómeno de El Niño; el caudal máximo se presenta en diciembre de 2010 con 125 m³/s. Este período corresponde a la fase fría del ENSO. Es importante mencionar que para la estación Miel 1 el comportamiento de los caudales está asociado al fenómeno de El Niño hasta abril de 2010; los mayores caudales se presentan en diciembre de 2010 y diciembre de 2011; este período corresponde al fenómeno hidrológico de La Niña, y los demás meses presentan un promedio de 55 m³/s, a excepción de agosto de 2011 que presenta un caudal de 27,6 m³/s. En Miel 2, Miel 3 y Embalse 1, el caudal disminuye notablemente a partir de junio de 2009 hasta junio de 2010, coincidiendo con el fenómeno del ENSO en su fase cálida. A partir de octubre de 2010 el caudal aumenta considerablemente con oscilaciones entre los 60 m³/s y 120 m³/s hasta abril de 2012, coincidiendo con la puesta en operación del trasvase y el fenómeno de La Niña.

En las estaciones Miel 2, Miel 3 y Embalse 1 el comportamiento del caudal es igual. Esta situación se debe a que no se cuenta con mediciones de caudal en cada estación y se asume el mismo valor de la estación Puente Samaná ubicada aguas arriba del trasvase, para las estaciones ubicadas sobre el río La Miel y cola del embalse.

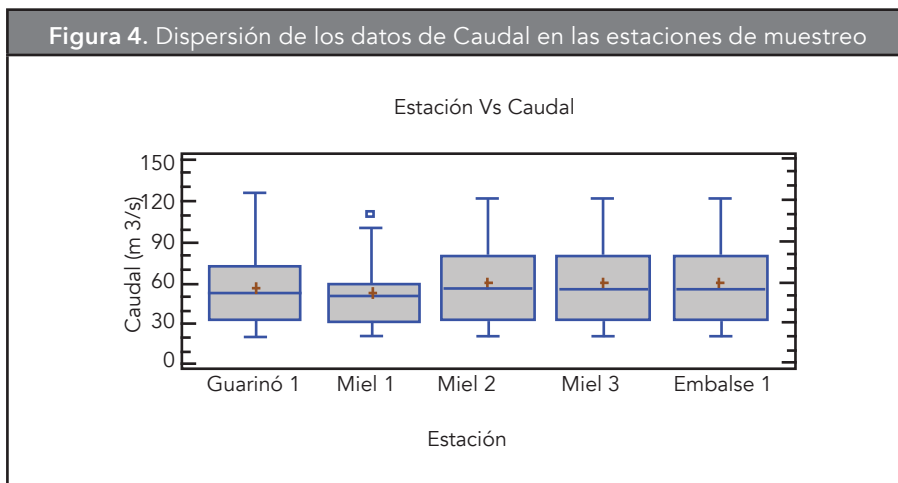
Tabla 2. Parámetros analizados

Variables			Factores de estudio
NTK (mg/L)	PT (mg/L)	O ₂ (mg/L)	Período hidrológico
NH ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ⁻³ (mg/L)	T (°C)	Momento
NO ₂ ⁻ (mg/L)	Caudal (m ³ /s)	pH	Estación
NO ₃ ⁻ (mg/L)	Carga N (kg/d)	Conductividad (uS/cm)	Mes
NTS (mg/L)	Carga P (kg/d)	SST (mg/L)	Año

Fuente: elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

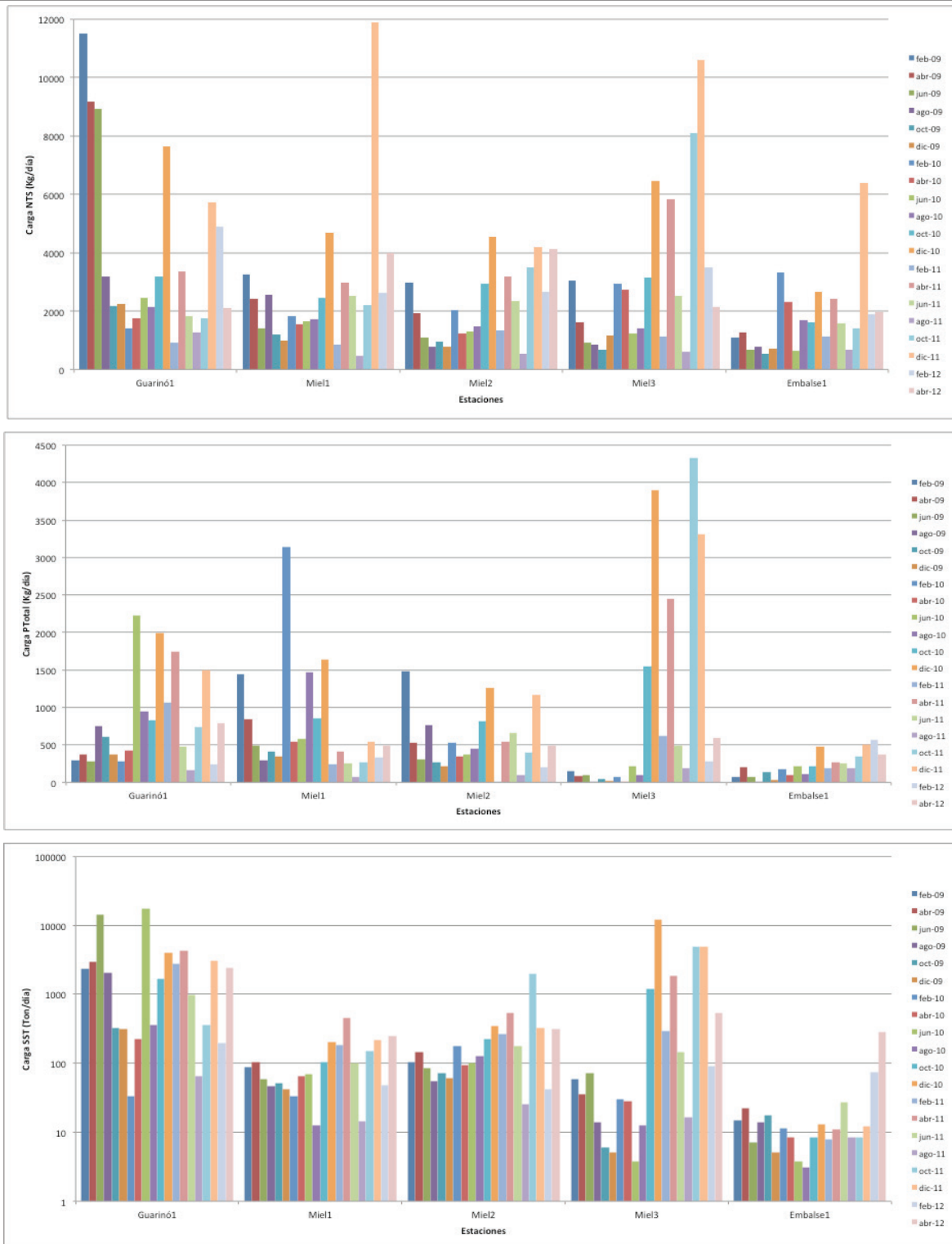


El valor más alto para la carga de Nitrógeno Total Soluble (NTS) se tiene en diciembre de 2010 en la estación Miel 1. Se observa un aumento en la carga de NTS en las estaciones ubicadas sobre el río La Miel con influencia directa del trasvase; en Miel 2, Miel 3 y Embalse 1, dicho aumento se da entre octubre y diciembre de 2010 (momento 2), como se muestra en la **Figura 5**. El promedio en la carga de NTS en el momento 1 es de 1478,02 Kg/día, y para el momento 2 esta carga aumenta a 3176,04 Kg/día. Considerando el NTS como

la fracción asimilable de las diferentes formas de nitrógeno, es importante realizar monitoreo y control con mayor frecuencia, pues se sabe que el aporte excesivo de nutrientes puede tener consecuencias en el estado trófico y producción primaria de los ecosistemas (Moreno-Franco, Quintero-Manzano, López-Cuevas, 2010).

En el momento 1, la estación Miel 3 registra los valores más bajos de carga de fósforo total (PT), para el momento 2 (octubre de 2011 y diciembre de 2010 y 2011) se registran en esta misma estación los valores

Figura 5. Variación temporal de la carga de NTS, P Total y SST en las estaciones de muestreo



Fuente: elaboración propia

más altos de PT. En general, la estación que presenta menos variabilidad en la carga de PT es la estación Embalse 1, como se puede observar en la **Figura 5**.

En cuanto a la carga de SST, la estación Guarinó 1 presenta los valores más elevados, como puede apreciarse en la **Figura 5**. Dadas las características físicas de la estación Guarinó 1, del sustrato del río y de las actividades antrópicas desarrolladas en su cuenca, se encuentra que estas difieren considerablemente de las características del río La Miel. Se presume que la zona asociada a la estación Guarinó 1 ha sido más intervenida, por lo que se explica la mayor concentración de nutrientes en esta estación. Si bien en la cuenca del río Guarinó se da una zonificación como se muestra en la **Figura 6**, es importante resaltar que dentro de esta cuenca se presenta un 4,22 % del área total con títulos mineros (Corpocaldas, 2010). Por su parte, el río La Miel en su cuenca alta, a diferencia del río Guarinó, es un sistema con un canal mucho más estable y con relativamente poco arrastre de materiales, lo que se evidencia en los altos valores de transparencia del agua medidos en estudios anteriores (Isagen, 2011).

3.2. Variables fisicoquímicas

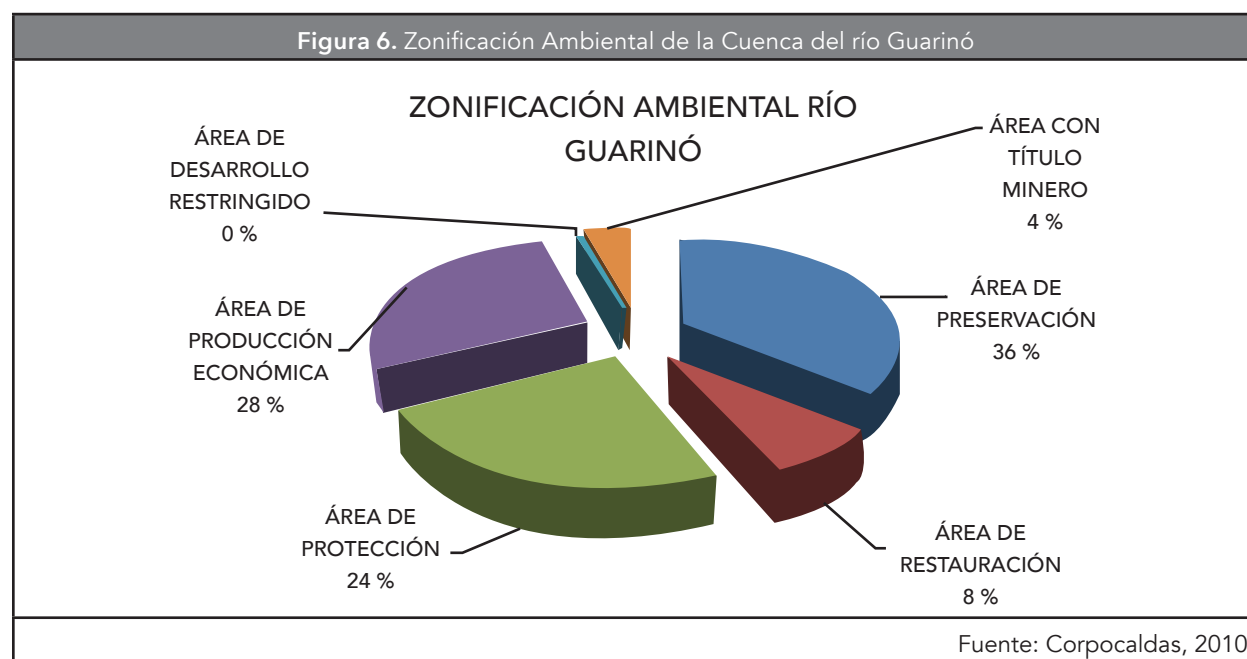
Estos parámetros reflejan diversos cambios entre estaciones y períodos de muestreo donde se

compara el comportamiento de los sistemas (lótico y léntico) de acuerdo con el momento, es decir, antes y después de la operación del trasvase. El desvío de agua de un depósito a otro representa una perturbación en la calidad del agua del sistema receptor y, como tal, puede influir fuertemente en las concentraciones de nutrientes (Fornarelli y Antenucci, 2011).

Las concentraciones de nitrógeno amoniacal (NH_3^-) oscilan entre 0,112 y 0,896 mg/l, donde se registran pocos valores para las estaciones Guarinó 1, Miel 1 y Miel 2 durante los períodos de muestreo.

Los nitritos (NO_2^-) presentaron valores bajos durante el tiempo de muestreo, esto puede ser debido a que es una forma inestable de fácil y rápida transformación en el proceso de nitrificación. Para las estaciones Guarinó 1, Miel 1 y Miel 2 se analizan valores promedio, dada la escasa información para algunos de los meses del estudio. Esta variable está en un rango entre 0,0033 y 0,15 mg/l, con una media general de 0,035 mg/l para las cinco estaciones durante todo el tiempo de muestreo.

Las concentraciones de nitratos (NO_3^-) representan el mayor aporte de las distintas formas del nitrógeno, en las dos cuencas (Guarinó y La Miel). Este compuesto constituye la fracción más representativa del nitrógeno total en el sistema. El proceso de nitrificación ocurre en dos etapas: comienza con la oxidación



del amoníaco a nitritos, seguido de la oxidación del nitrito a nitrato. Este proceso se puede ver afectado por factores abióticos como el oxígeno, la temperatura y el pH y por procesos biológicos de asimilación por parte de los organismos asociados (Chlot, *et al.*, 2011). En Guarinó el NO_3^- obtiene un valor más elevado que las demás estaciones, esta estación se encuentra ubicada en una cuenca con características físicas y químicas diferentes con respecto a La Miel. El valor más elevado se registra en febrero de 2009 (9,1 mg/l) y el menor en abril de 2012 (0,3070 mg/l). La estación Miel 3 se caracteriza por un gran número de valores reportados por debajo del límite de detección ($\text{NO}_3^- < 0,112$ mg/l). Aquellos valores que lograron ser cuantificados para el momento 1 oscilan entre 0,224 mg/l y 0,56 mg/l. Con respecto al momento 2, el NO_3^- presenta un rango de 0,357 mg/l y 0,859 mg/l. La estación ubicada en la cola del embalse presenta los valores más bajos de NO_3^- , comparado con las demás estaciones.

El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) no presenta una tendencia clara y marcada durante el tiempo de estudio; esta fracción de nitrógeno fluctúa entre valores inferiores al límite de detección del método ($< 0,112$ mg/L) y 15,10 mg/l. Este último se registra en agosto de 2009 en la estación Guarinó 1, siendo esta estación la que registra los valores más altos durante el tiempo de muestreo. El promedio general en todas las estaciones de NTK es de 1,218 mg/l.

El fósforo total se caracteriza por presentar poca variabilidad en las estaciones de muestreo, con registros promedio que oscilan entre 0,12 y 0,19 mg/L, a diferencia de la estación Embalse 1, donde el valor promedio es de 0,044 mg/L.

La temperatura del agua en las estaciones de muestreo corresponde a un ambiente cálido, oscilando entre 18,5 y 27,8 °C. Se presentan variaciones durante el tiempo de muestreo debido a las menores temperaturas del ambiente y del ingreso de aguas más frías como consecuencia de las lluvias ocasionadas por el fuerte invierno, principalmente en los últimos meses de 2010 y 2011.

El pH para todas las estaciones de muestreo oscila entre 6,6 y 8,8, es decir, cercanos a la neutralidad con una leve tendencia a la alcalinidad. No se presentan cambios abruptos entre estaciones y períodos de monitoreo.

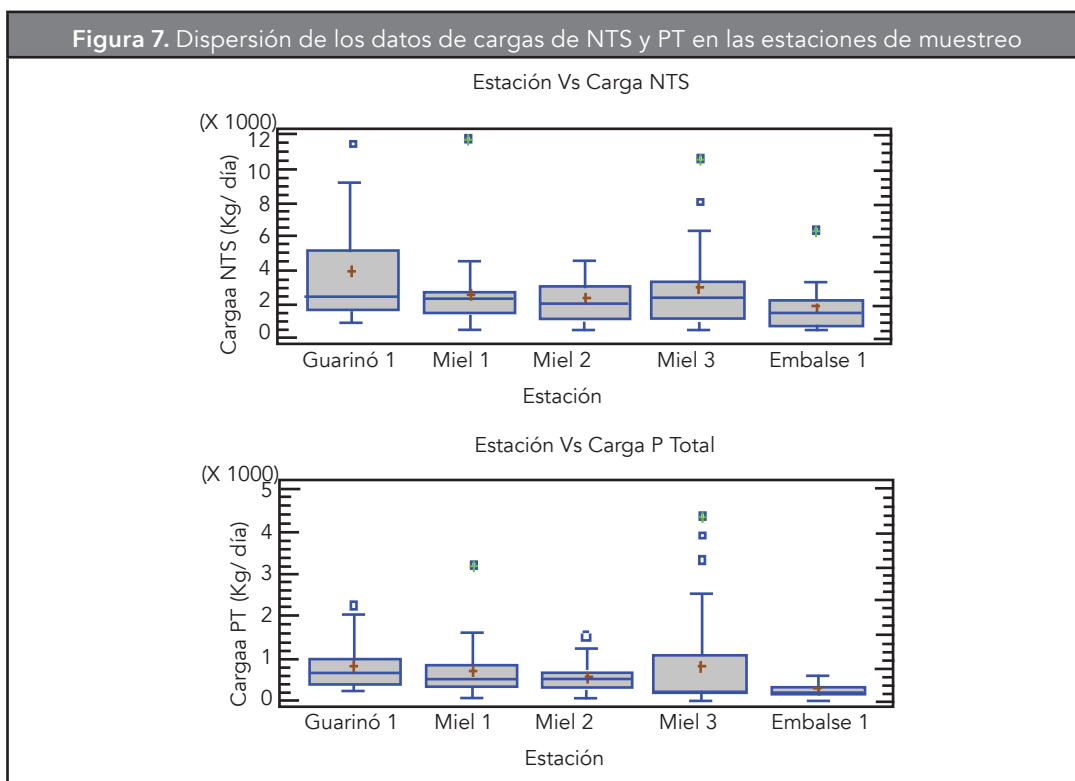
La concentración de oxígeno disuelto es superior a 5,24 mg/l en todas las estaciones y períodos de muestreo, excepto en agosto de 2011, donde en la estación Embalse 1 (cola del embalse) se registra una concentración de 2,19 mg/l de Oxígeno (O_2). En términos generales estos valores reflejan una buena calidad del agua en lo que atañe a la capacidad de albergar vida acuática.

La conductividad eléctrica muestra una apreciable diferencia en el comportamiento entre la estación ubicada en el río Guarinó y las ubicadas sobre el río La Miel. El valor promedio de la conductividad en Guarinó 1 es de 113,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en el río La Miel el promedio de las estaciones oscila entre 37,36 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 54,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

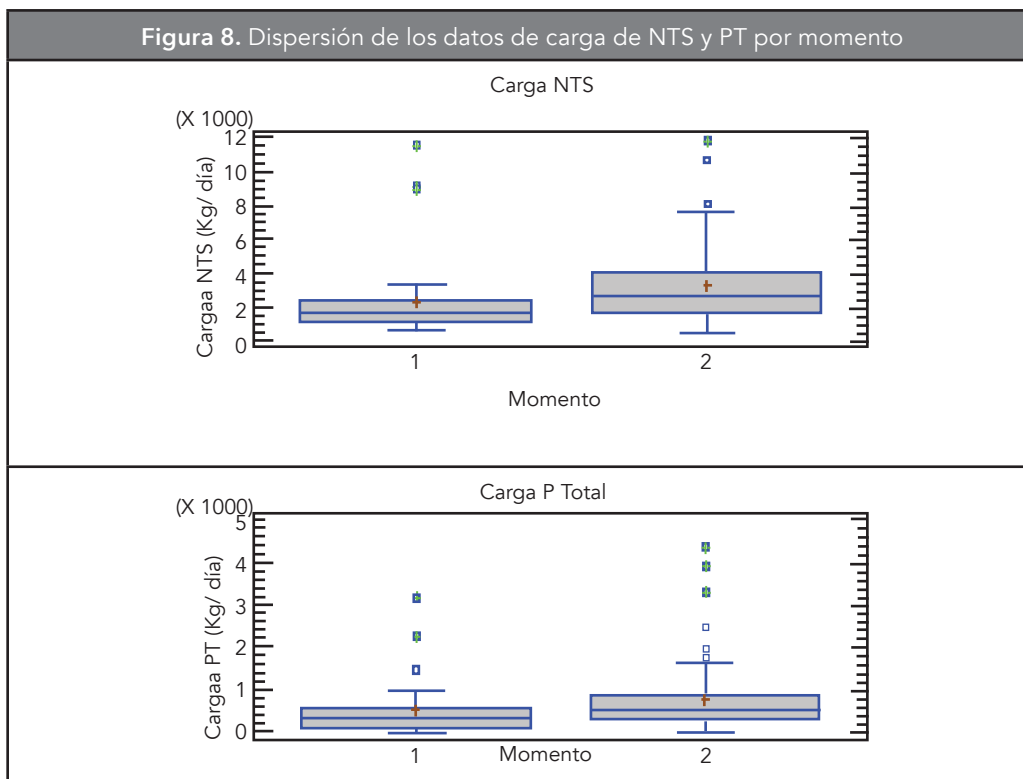
Los valores de caudal que se asumen para las estaciones ubicadas sobre el río La Miel corresponden a los que se toman en la estación Puente Samaná, pues no se cuenta con registro para cada una de las estaciones de muestreo.

A las estaciones Miel 2, Miel 3 y embalse 1 se les adiciona el caudal trasvasado en cada mes, por esto presentan el mismo comportamiento; los valores de caudal para todas las estaciones oscilan entre 18,2 m^3/s y 125,4 m^3/s .

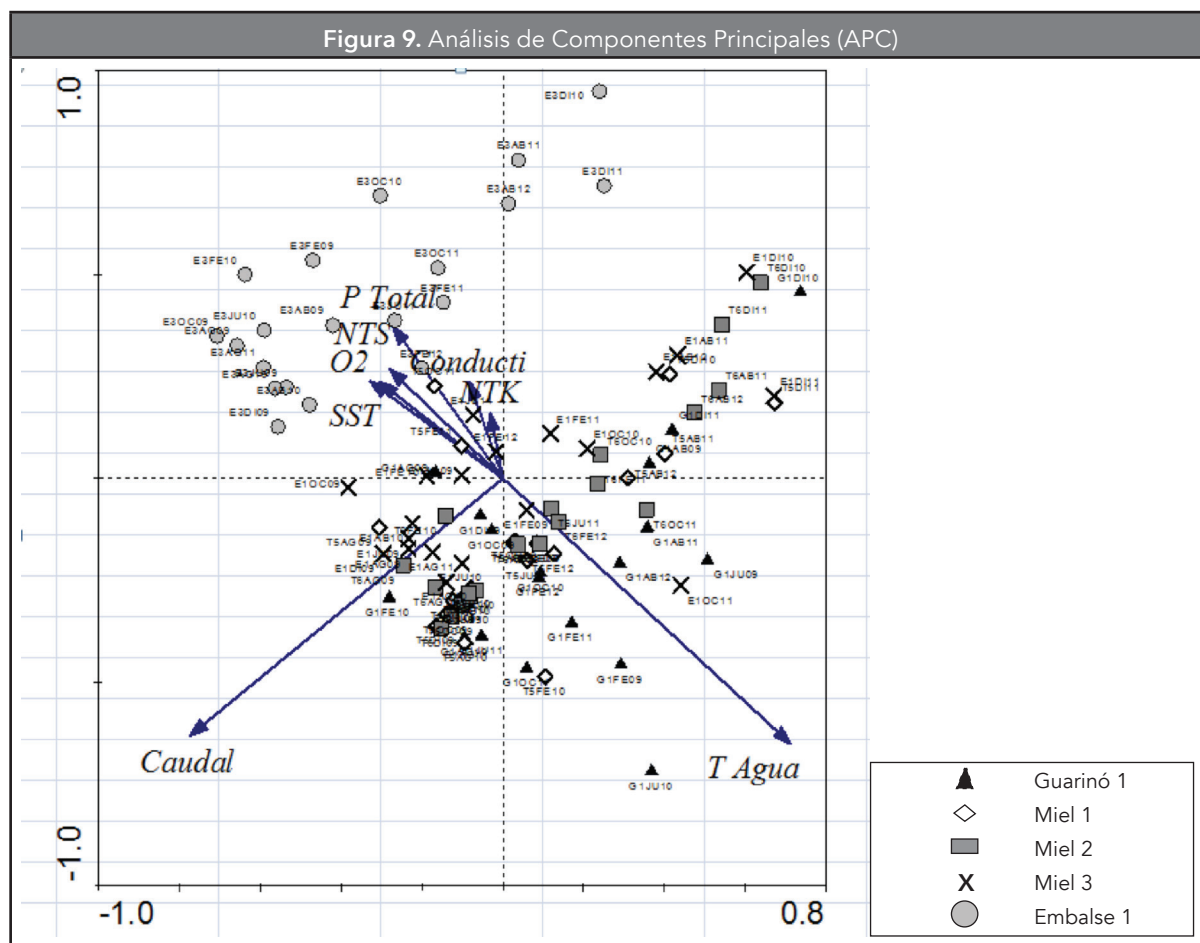
La **Figura 7** presenta las cajas esquemáticas del caudal, el NTS y el PT con respecto a las cinco estaciones de muestreo. Estos esquemas reflejan el comportamiento general de las variables y su dispersión durante todos los períodos de muestreo. Las estaciones Guarinó 1 y Miel 1, no tienen influencia directa del trasvase, razón por la cual la dinámica de nutrientes está asociada a las condiciones naturales de la zona. La estación Miel 2 se encuentra a solo 50 m después de la descarga del trasvase en el río La Miel, por tanto los parámetros medidos no reflejan el efecto directo de dicha obra en términos de nutrientes, porque se dan procesos de resuspensión, alta turbulencia y oxigenación. La estación que mejor evidencia la influencia del trasvase es Miel 3, pues en esta ya se ha presentado mezcla completa del caudal natural de La Miel y el trasvasado. Además, el sistema es más homogéneo respecto a Miel 2, y los procesos de transformación de nutriente no se ven afectados por las características físicas de la descarga y las fuertes fluctuaciones, dada su proximidad a la cola del embalse.



Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

En Embalse 1, el sistema presenta mayor estabilidad debido a procesos de asimilación de nutrientes por parte de organismos acuáticos, evidenciándose una menor variabilidad, dada la importante influencia que tienen los organismos vivos (bacterias, algas bentónicas, macrófitas e invertebrados bentónicos) en el ciclo del fósforo, al igual que factores ambientales como la temperatura, pH y oxígeno (Ccopa, 2003).

Las cargas de NTS y PT aumentan considerablemente para el momento 2 como consecuencia del aumento del caudal. El valor promedio para el momento 1 en la carga de NTS es 2157 Kg/día y para la carga de PT es 466,3 Kg/día; en el momento 2 el valor medio de la carga de NTS aumenta a 3253 Kg/día y para PT aumenta a 827,7 Kg/día y estos cambios en la carga de nutrientes pueden tener efectos profundos en los procesos de atenuación natural llevados a cabo por los sedimentos que son considerados contaminantes (Koelmans, *et al.*, 2001).

Considerando las estaciones, muestreos y variables ambientales, los dos componentes representados en el gráfico constituyen el 57,1 %; el cuarto componente explica un 83,1 % de la varianza total de los datos.

De acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP), el caudal y la temperatura no son variables correlacionadas. La Temperatura tiene una relación inversa con SST, O₂, PT, NTS, Conductividad y NTK. La magnitud del vector de la temperatura indica mayor importancia o influencia respecto a la variabilidad de los datos. Adicionalmente, la **Figura 9** esquematiza la separación del gradiente ambiental entre los datos anuales (momento 1 y momento 2).

3.3. Correlaciones

A partir del gráfico de Análisis de Componentes Principales, se determinan las variables con mayor

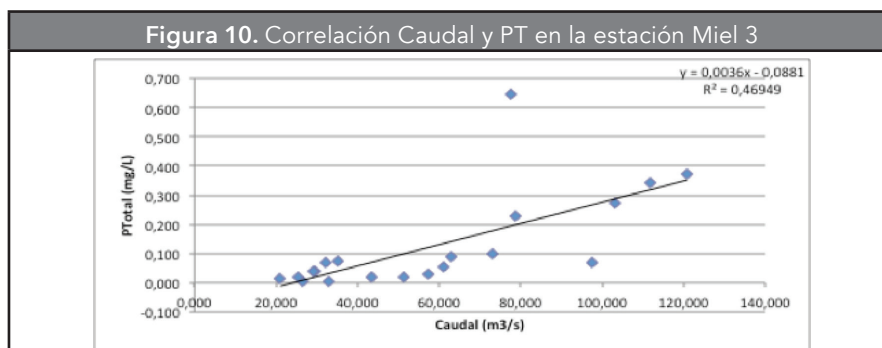
influencia para correlacionar. Como se describió anteriormente, el Caudal y la Temperatura presentan una marcada independencia, y es a partir de esta característica que se plantean algunas correlaciones.

En la **Figura 10**, puede apreciarse que el Caudal y el PT presentan una relación directa; esta condición puede explicarse desde el punto de vista de la dinámica de nutrientes, pues los ríos transportan una carga de materia soluble y particulada que provienen de los lixiviados y escorrentías de la cuenca que drenan y existe una fuerte correlación entre las cargas de nitrógeno y PT en los ríos con el uso de la tierra, y especialmente con las prácticas agrícolas (Movellán, 2003). Esto puede evidenciarse en la fuerte relación existente entre Caudal y PT, si se tiene en cuenta que las condiciones entre cuencas son diferentes, Guarínó presenta características fisicoquímicas y antropogénicas diferentes a La Miel. Además, se da una respuesta directa al aumento de Caudal en términos de nutrientes para la estación Miel 3, es decir, si aumenta el Caudal, aumenta la concentración de PT en el período de muestreo comprendido entre febrero de 2009 y abril de 2012.

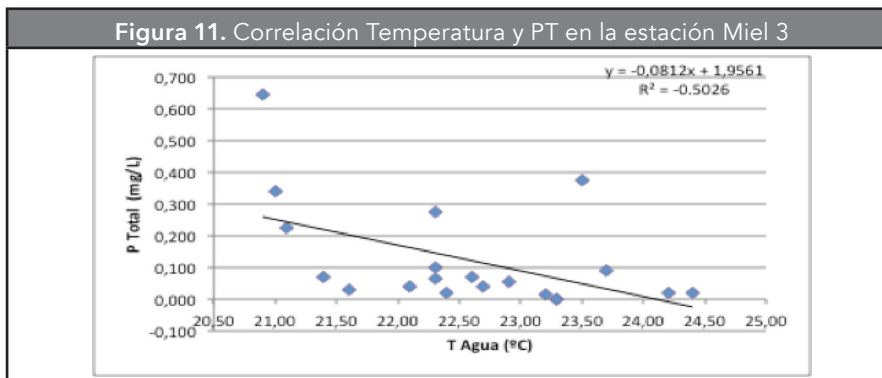
En la **Figura 11**, por su parte, puede apreciarse que la Temperatura y el PT tienen una relación inversa. Además, se observa que la Temperatura del agua no influye en los procesos de transformación del fósforo.

3.4 Modelos Simples de Eutrofización

Un modelo puede describir la calidad del agua a un nivel altamente detallado, al mismo tiempo que identifica los procesos que impactan dicha calidad, permite interpolar datos, predecir los tipos de riesgo a los que se ven sometidos los cuerpos de agua, las sustancias químicas que causan dicho riesgo, y pronosticar problemas específicos como lo es el modificar las condiciones de determinado cuerpo de agua, de manera tal que cumpla con las normas de calidad estipuladas para el determinado uso que se le dará al mismo (Silva-Arroyave, 2008). El empleo de modelos matemáticos permite predecir los impactos en la calidad del agua, debidos a un cambio de actividades en la cuenca y, de esta forma, establecer las prioridades de desarrollo en función de los usos deseados del recurso hídrico (Salas y Martino, 2001).



Fuente: elaboración propia



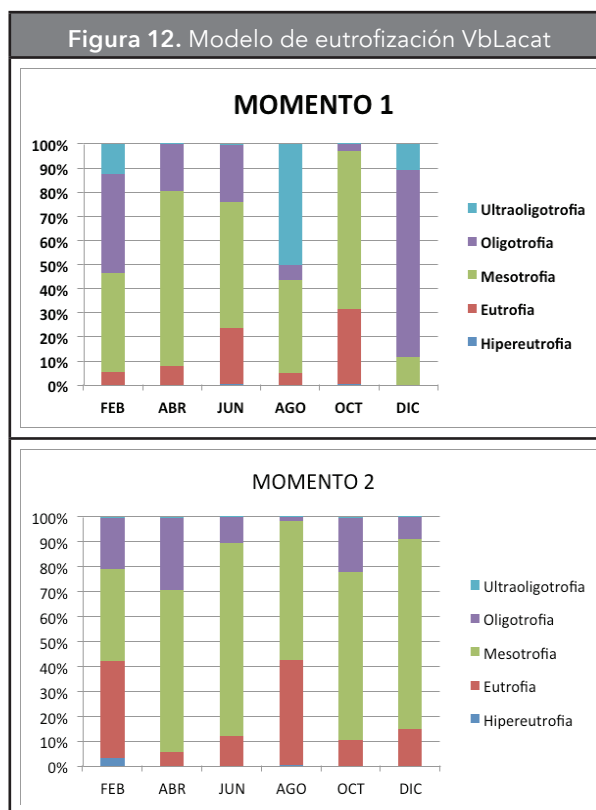
Fuente: elaboración propia

3.4.1 VbLacat

Para la evaluación del estado trófico de los embalses —que refleja la calidad del agua que reciben y en especial la carga de nutrientes— se emplean metodologías simplificadas para embalses cálidos tropicales como el modelo VbLacat (Molina, *et al.*, 2004) modificado del LACAT del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS. Los cuerpos de agua bajo esta metodología se pueden clasificar en: oligotróficos (como sistemas acuáticos con bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima), eutróficos (con alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva) y mesotróficos (con características intermedias a los dos anteriormente descritos (Cuéllar-Márquez, 2009).

El modelo simple de eutrofización VbLacat utiliza el PT como variable respuesta en el ecosistema y asume que todos los cambios de estado trófico están dados en función de este parámetro por considerarse el nutriente limitante en la producción primaria. El concepto de nutriente limitante se basa en la premisa que, dada una determinada estequiometría celular de las plantas acuáticas, el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa vegetal es aquel que primero se consume o que alcanza un mínimo antes que los otros nutrientes relativos a tal estequiometría (Salas y Martino, 2001). El incremento en PT se debe a una interacción compleja entre procesos físicos, químicos y biológicos, que suceden tanto en presencia de oxígeno como en ausencia de este (Fraile, Orive y Pozo, 1995).

Este modelo es aplicable en sistemas lénticos, en este caso, la estación Embalse 1, correspondiente a la cola del embalse Amaní. Para evidenciar con mayor claridad el efecto del trasvase, se dividió el tiempo de muestreo en momento 1 y momento 2, es decir, antes y después de la operación del trasvase. Se tuvo además en cuenta el periodo hidrológico promediando los valores por meses. Para el momento 1, el estado trófico dominante en términos generales es la mesotrofia, con presencia de ultraoligotrofia y oligotrofia en agosto y diciembre, respectivamente. Durante este periodo no se presenta hipereutrofia. En el momento 2 se evidencia hipereutrofia en febrero y agosto y desaparece la ultraoligotrofia en este período, la oligotrofia disminuye



Fuente: elaboración propia

considerablemente, pero el estado trófico dominante continúa siendo la mesotrofia (Ver **Figura 12**).

El TSI es el índice de estado trófico modificado de Carlson (1977), que consiste en determinar el TSI para transparencia medida con el Disco Secchi, P Total y Clorofila usada como un indicador del nivel trófico en los ambientes acuáticos (Mendoza-España, *et al.*, 2011). Este índice se aplica para todo el tiempo de muestreo. Los resultados que se obtienen después de aplicar las ecuaciones para cada variable indican que el sistema es mesotrófico (rango de TSI entre 30 y 60).

La eutrofización es el proceso de sobreproducción de algas y macrófitas en cuerpos de agua que puede generar problemas en ciertos usos como son, entre otros: suministro de agua potable por alteración de sus propiedades organolépticas (olor, sabor), corrosión del equipo hidroeléctrico y distintos trastornos en los procesos del tratamiento potabilizador por disminución del contenido de oxígeno, acumulación de amoníaco en la columna de agua y resuspensión de ciertos metales (Hierro, Manganeseo) del sedimento bajo condiciones

3.4.2 TSI (Aizaki, et al., 1981) Mesotrófico

TSI (DiscoSecchi)

$$=10 * (2,46 + \frac{3,76-1,57 \ln DS}{\ln 2,5})$$

$$TSI (Clorofila) = 10 * (2,46 + \frac{\ln Cl}{\ln 2,5})$$

TSI (Fósforo total)

$$=10 * (2,46 + \frac{6,68 + 1,15 \ln PT}{\ln 2,5})$$

Estado de eutrofia
Oligotrófico (TSI<30)
Mesotrófico (30<TSI<60)
Eutrófico (60<TSI<90)
Hipereutrófico (90<TSI<100)

anóxicas. Aunque es un proceso que, de forma lenta puede tener un origen natural, hoy en día es, fundamentalmente, de carácter cultural, acelerado por el aporte continuo de nutrientes de origen antropogénico (Salas y Martino, 2001). Los modelos anteriormente mencionados establecen el grado de eutrofia del sistema y a partir de esta información se pueden sugerir medidas de manejo que minimicen el aporte de nutrientes al ecosistema si se desea mantener en condiciones óptimas para la generación de energía.

4. CONCLUSIONES

1. En las estaciones de muestreo localizadas en el río Guarinó (Guarinó 1), en el río La Miel (Miel 1, Miel 2, Miel 3) y en la cola del embalse (Embalse 1) el período hidrológico tiene influencia en el aumento y/o disminución de las cargas de nutrientes y caudales, pues las lluvias generan un lavado natural de los suelos y mayor arrastre de los sedimentos asociados a las cuencas. Específicamente en las estaciones Guarinó 1 y Miel 1, el caudal es afectado por el periodo hidrológico; en Miel 2, Miel 3 y Embalse 1 es además influido por el caudal trasvasado.

2. En cuanto a los cambios espaciales y temporales en las concentraciones y cargas de nutrientes, la estación Miel 3 es la que evidencia con mayor claridad estos cambios porque ya existe una mezcla completa del caudal natural de La Miel y el trasvasado, haciendo que el sistema sea mas homogéneo. Los procesos de

transformación de nutrientes no se ven afectados por las características físicas de la descarga y las fuertes fluctuaciones como en Miel 2, ubicada a solo 50 m de la descarga.

3. En la cola del embalse (Embalse 1), la capacidad de asimilación es alta, debido a que la variación del estado trófico entre momentos no es apreciablemente significativa. Además, las concentraciones de nutrientes disminuyen por los procesos de asimilación por parte de organismos acuáticos.

REFERENCIAS

- Ccopa-Rivera, E.A. (2003). Modelo Sistemico para Comprender o Processo de Eutrofização em um Reservatório de Água. Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.
- Chlot, S.; Widerlund, A.; Siergieiev, D.; Ecke, F.; Husson, E.; Öhlander, B. (2011). Modelling nitrogen transformations in waters receiving mine effluents. *Science of The Total Environment*, 409(21), pp. 4585-4595.
- Cornare, Corantioquia, Área Metropolitana, y Universidad Nacional de Colombia (2007). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá. Medellín, diciembre.
- Corpocaldas (2010). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Guarinó – Caldas y Tolima. Capítulo I, zonificación ambiental.
- Cuéllar-Márquez, W. (2009). Gestión integral de embalses en EPM. *Revista Empresas Públicas de Medellín (EPM)*, 1.

- Fornarelli, R.; Antenucci, P. (2011). The Impact of Transfers on Water Quality and the Disturbance Regime in a Reservoir. *Water Research*, 45(18), pp. 5873-58885.
- Fraile, H; Orive, E.; Pozo, J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora). *Limnética*, 11 (2), pp. 29-37.
- Isagen (2011). Monitoreo y seguimiento hidrobiológico del proyecto Tránsito Guarín. Universidad Católica de Oriente. Rionegro, Colombia.
- Isagen (2011). Central hidroeléctrica Miel I. Disponible en: http://www.isagen.com.co/metaInst.jsp?rsc=infoIn_centralMiel1 [Consultado el 10 de diciembre 2011].
- Koelmans, A.; Van Der, A.; Knijff, L.M.; Aalderink, R.H. (2011). Integrated modelling of eutrophication and organic contaminant fate & effects in aquatic ecosystems. Aquatic Ecology and Water Quality Management Group, Department of Environmental Sciences. Wageningen University. Deventer, Netherlands, 35(15), pp.3517-3536.
- Mendoza-España, M. del C.; Martínez, J.M.; Moreira-Turcq, P.; Bonnet, M. P.; Espinoza-Villar, R.; Villagra-DeGamundi A.; Abril, G.; Seyler, P. (2011). Monitoreo espacial y temporal del estado trófico de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía central mediante sensores remotos. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE pp.5324-5331.
- Molina, R; Toro, A; Villegas, N; Aguirre, N. y Palacio, J (2004). Recursos hídricos, control de inundaciones y embalses. Colombia.
- Moreno-Franco, D.P.; Quintero-Manzano, J.; López-Cuevas, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Universidad Autónoma Metropolitana. *Contactos* 78, pp.23-33.
- Movellán, E. (2004). Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del río Ebro. Memoria de tesis. Universidad de Barcelona. España.
- Román, R. (2011). Caracterización espacio temporal de la estructura térmica de un embalse tropical poco profundo, abastecido parcialmente por bombeo. Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Investigación: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (PARH), Medellín, Colombia.
- Salas, H.J.; Martino, P. (2001). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales.
- Silva-Arroyave, S.M. (2008). Evaluación de la calidad del agua del futuro embalse Porce III por la influencia de la descarga del embalse Porce II. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 7(13).
- Siyue-Li; Wenzhi-Liu; Xiaoli-Cheng; Zhifang-Xu; Quanfa-Zhang (2009). Spatio-Temporal Dynamics of nutrients in the Upper Han River Basin, China. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), pp.1340-1346.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Benjumea-Hoyos, C.A.; Bedoya-Castaño, C. L.; Álvarez-Alzate, D.A. (2014). evolución en la carga de nutrientes de ríos de montaña que fluyen a un embalse, cuenca media del río Magdalena. *Revista EIA*, 11(22) julio-diciembre, pp. 77-91. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.22.77-91>