

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN/RESEARCH ARTICLE

RESPUESTA DE LA CLOROFILA Y EL METABOLISMO DE UN ARROYO ANDINO AL AUMENTO DE TEMPERATURA EN UN EXPERIMENTO *ex situ*

Response of Chlorophyll and Metabolism of an Andean Stream to a Temperature Increase in an *ex situ* Experiment

Viviana INFANTE CANGREJO¹, Jhon Charles DONATO RONDÓN¹.

¹ Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Carrera 30 n°. 45-03, edificio 421. Bogotá D.C., Colombia.

For correspondence. vinfantec@unal.edu.co

Received: 26th October 2016, **Returned for revision:** 28th November 2016, **Accepted:** 30th January 2017.

Associate Editor: Sergi Sabater.

Citation/Citar este artículo como: Infante Cangrejo V, Donato Rondón JC. Respuesta de la clorofila y el metabolismo de un arroyo Andino al aumento de temperatura en un experimento *ex situ*. Acta biol. Colomb. 2017;22(2):191-198. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n2.60741>

RESUMEN

En los trópicos, el cambio climático puede significar un incremento en la temperatura que puede afectar la diversidad biológica de los ecosistemas fluviales, favoreciendo la llegada de especies propias de aguas más cálidas. La variación de temperatura puede también afectar las relaciones tróficas y el metabolismo del sistema. En el presente estudio, se analizó el efecto de 2-4 °C de aumento de la temperatura del agua sobre el ensamble de diatomeas y el metabolismo del río Tota (alta montaña andina). Para este propósito, se utilizaron canales artificiales de recirculación, en los que diariamente se midieron variables fisicoquímicas (pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y velocidad del agua), se recolectaron e identificaron diatomeas, se midió la clorofila-a y el metabolismo mediante cámaras recirculantes. Se encontraron diferencias significativas entre las variables fisicoquímicas medidas. Aunque no se pudo detectar diferencias significativas en las variables respuesta atribuibles al aumento de la temperatura, si hubo respuestas cualitativas en la clorofila y en el metabolismo. El trabajo experimental representa un aporte para el estudio del impacto del aumento de temperatura sobre los sistemas lóticos de alta montaña en Colombia. Los resultados ilustran los posibles cambios que se pueden registrar en los sistemas de alta montaña andina como consecuencia del cambio climático.

Palabras clave: arroyo Neotropical, biofilm, cambio climático, canales recirculantes.

ABSTRACT

The variation in temperature associated with climate change in the tropics may affect biodiversity of river ecosystems, favoring the arrival of warmer water species. The variation in temperature can also affect the trophic relationships and metabolism of the river ecosystem. In the present study, we sought to determine the effect of 2-4 °C increase of water temperature in the river Tota (Andean high mountain) on the diatoms assemblage and river metabolism. For this purpose, artificial recirculation channels were used, and physicochemical variables (pH, conductivity, temperature, dissolved oxygen and water velocity) were daily measured, diatoms were collected and identified, chlorophyll-a was measured, and metabolism was estimated by means of recirculating chambers. We find significant differences in the physicochemical variables. Qualitative changes in chlorophyll and metabolism were observed, but significant differences in response variables attributable to the increase in temperature could not be detected. The experimental work represents an input to studies about temperature increase impact over high mountain lotic systems. The results illustrate the possible changes that can be recorded in the Andean high mountain systems as a result of climate change.

Keywords: biofilm, climate change, Neotropical stream, recirculating channels.



INTRODUCCIÓN

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático predice que debido al calentamiento global se presentarán aumentos de temperatura y cambios en la distribución y frecuencia de las precipitaciones (IPCC, 2007). En los trópicos, esta variación puede significar principalmente un incremento lineal en la ya constante y elevada temperatura que caracteriza estos ecosistemas. Tales cambios pueden afectar la diversidad biológica de los ecosistemas fluviales, con la llegada de especies más termófilas (o su desplazamiento desde altitudes menores hacia otras mayores), la alteración de los patrones de procesamiento de la materia orgánica (Sabater *et al.*, 2008), las relaciones tróficas existentes y el metabolismo. Cualquiera que sea el cambio, hoy en día es ampliamente aceptado que el cambio climático afecta a los ecosistemas (Walther *et al.*, 2002). En ríos y arroyos, la investigación del aumento de la temperatura del agua y el efecto de los cambios en los patrones de precipitación se ha centrado principalmente en los aspectos hidrológicos y menos en los biológicos (Young y Huryn, 1997; Boix *et al.*, 2010). La temperatura es uno de los factores clave relacionado con los diferentes procesos fisiológicos como la respiración, el crecimiento, la tasa metabólica y la alimentación, que no sólo afectan a los individuos, sino también sus interacciones (Vasseur y McCann, 2005).

Se espera que el aumento de la temperatura del agua incida en la mayor producción primaria, tasas de descomposición más rápidas y, en consecuencia, en las conexiones tróficas que se suceden en los ríos altoandinos. Dado que la temperatura afecta de forma diferencial a los distintos organismos, es posible que ocurran cambios en las interacciones entre ellos.

Siendo una región tropical, en los Andes se ha observado un incremento de la temperatura de 0,7 °C en promedio en los últimos 70 años (Vuille *et al.*, 2008), las predicciones plantean que el norte de los Andes se calentará más lentamente que el promedio global. No obstante, el calentamiento anual para la década de 2050 variará de un poco más de 1 °C en el escenario bajo hasta a más de 3 °C en el escenario más alto. La tasa de calentamiento será constante a través del año, pero será un poco más rápida en la meseta andina y en el interior de la región, que a lo largo de las costas del Pacífico y el Caribe (Matheuss y Ewann, 1999).

La temperatura del agua del río regula el metabolismo de todos los organismos (Gillooly *et al.*, 2002), su aumento lleva a un incremento de la respiración bacteriana y del metabolismo del biofilm microbiano fluvial. Los grupos microbianos bentónicos del biofilm fluvial (algas, bacterias, hongos, protozoos) están ensamblados formando una estructura tridimensional donde tiene lugar las interacciones entre los organismos, y por lo tanto existen respuestas emergentes, no necesariamente análogas a las individuales debidas a esta interacción (Sabater *et al.*, 2009).

Se estudió en condiciones *ex situ* el efecto del incremento de la temperatura del agua sobre las comunidades bentónicas de diatomeas de un arroyo altoandino (Río

Tota, cordillera oriental de los Andes colombianos). Se caracterizaron los cambios en la estructura de las diatomeas del biofilm microbiano, la clorofila y el metabolismo. Este estudio tiene por objetivo contribuir para predecir los impactos del calentamiento global sobre la diversidad y el funcionamiento de un ecosistema fluvial del norte de los Andes. Nuestra hipótesis de investigación es que el aumento de la temperatura afectará la productividad y la estructura de la comunidad de diatomeas en ecosistemas andinos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Generalidades de la zona de estudio y fase de campo

El río Tota es un arroyo de tercer orden ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia, su cuenca de drenaje tiene un área de 149,9 km² (Castro y Donato, 2008). El muestreo para la colonización de los sustratos y los volúmenes de agua del río (previo a la parte experimental), se llevó a cabo en el sector medio bajo del río (05°58'15" N y 72°98'64" W), a 2580 m s.n.m.. El promedio del caudal del río Tota es de 0,67 m³s⁻¹ (1965-2001) (Castro y Donato, 2008). La conductividad, dependiendo del tramo del río estudiado y otras condiciones, varía desde 28, 67 hasta 303 µScm⁻¹. El pH oscila entre 6,53 y 8,16. En lo que respecta a la temperatura del agua, se ha encontrado un valor promedio mínimo de 11,7 °C y un valor promedio máximo de 21,03 °C (Castro y Donato, 2008).

La comunidad de diatomeas presenta especies de amplia distribución geográfica como *Rhoicosphenia abbreviata*, *Gomphonema parvulum*, *Melosira varians*, *Navicula cryptocephala* y *Reimeria sinuata*, entre otras. Se caracteriza por presentar una baja diversidad algal con unas pocas especies dominantes, que varían dependiendo de la época climática (Pedraza y Donato, 2011).

Previo a la fase experimental, se tomaron muestras de agua del río para asegurar condiciones similares en el estudio *ex situ*, y se recolectaron sustratos (rocas) con presencia de biofilm, los cuales se lavaron en seis litros de agua y se dispusieron en los canales para el crecimiento de algas sobre los sustratos artificiales para su "aclimatación" durante 15 días. Como sustrato artificial fueron usados bloques de arcilla de 2cm de largo, 0,5 cm de alto y 1 cm de ancho.

Diseño y montaje experimental

Se manejó un diseño experimental en bloques propuesto por Hinkelman (1994) (En: Mendoza y Bautista, 2002), con dos tratamientos (aumento de temperatura y control), cada uno contó con tres unidades experimentales, es decir, tres canales de recirculación (réplicas biológicas) y, durante el muestreo, con una réplica técnica. Las unidades experimentales dentro de cada tratamiento fueron homogéneas entre sí, y solo se diferenciaron en la variable de estudio (temperatura).

Los canales de recirculación poseían una pared de 10 mm de grosor, contaban con medidas de 1,80 m de largo, 0,15m de alto y 0,16m de ancho, con capacidad de 22 L cada uno (debido a que, por seguridad y eficiencia, no se llenaban completamente), y un sistema de iluminación programado

que emitía entre 1470-1490 lux. Cada canal tenía una motobomba sumergible (Hj-742), de 8w de potencia, que recirculó el agua a 600 L/h.

Se dispusieron tres canales a la temperatura basal del agua (entre 18,1 y 19,9 °C); mientras que los tres restantes estuvieron de 2 a 4 °C por encima de la temperatura basal (entre 21,6 y 23,1 °C). El incremento de temperatura en los canales “tratamiento” se consiguió mediante resistencias que tenían una potencia de 500 w a 110 v. La temperatura se midió en continuo, con ayuda de una sonda especializada que estuvo conectada directamente a una caja de control.

La fase experimental duró 35 días, en los que se tomaron muestras de diatomeas cada dos días para un total de 18 muestreos, durante los cuales se se midió la clorofila a y el metabolismo, con el fin de estimar la respuesta del calentamiento sobre el biofilm algal.

Recolección y determinación taxonómica de diatomeas

Para cada muestreo se tomaron sustratos de colonización (uno por cada canal) y, con ayuda de un pincel, se tomaron alícuotas de algas posteriormente fijadas en formol al 4 %. Previo a la determinación e identificación taxonómica, las muestras se oxidaron con peróxido de hidrógeno al 30 %, con el objeto de eliminar la materia orgánica (Gómez *et al.*, 2009). Los montajes se elaboraron con Naphrax (índice de refracción de 1,74). Se contaron entre 400 y 500 valvas a 1000X. La identificación se llevó al nivel de especie utilizando las claves taxonómicas especializadas de Krammer y Lange-Bertalot (1986; 1991a; 1991b); Metzeltin y Lange-Bertalot (1993, 2001); y Kelly (2000).

Estimación de la clorofila “a”

En cada muestreo se tomó al azar por cada canal un sustrato de 1 cm² de área, donde se midió la concentración de clorofila presente en el biofilm algal por medio del método fluorométrico introducido por Yentch *et al.* (1963) (citados por APHA, 1989). Se utilizó un fluorómetro portátil (10-AU Turner designes), para realizar mediciones *in vivo* (Kromkamp y Forster, 2003).

Metabolismo

Se usaron ocho cámaras recirculantes cuatro de ellas claras (producción neta) y otras cuatro oscuras (respiración) (Acuña *et al.*, 2009). Dentro de las cámaras se colocaron los sustratos artificiales colonizados y se dejaron en incubación durante una hora aproximadamente. El metabolismo se estimó cada tres días, y se efectuó un total de 16 mediciones durante el experimento. Para estimar la Productividad Primaria Bruta (PPB) se siguieron las recomendaciones de Acuña *et al.* (2011).

Análisis físicos y químicos

Se tomaron datos diarios de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad con uso de una sonda multiparámetro HACH 14d. Se midió la velocidad de la corriente con un correntómetro digital (Schiltknecht MiniAir 20). Para la

estimación de los nutrientes (amonio, nitros, nitratos y fosfatos) se siguieron los protocolos de APHA (1998).

Análisis e interpretación de los datos

La diversidad de diatomeas se calculó para cada muestra mediante los índices de Shannon-Wiener y de Margalef, mediante el programa PAST- Paleontological Statistics (versión 3.0). Índices, datos físicos y químicos y metabolismo se representaron con gráficos de caja y bigotes obtenidos a partir del programa Statgraphics Centurion XVI versión 16.2.04. Para comparar las variables respuesta del tratamiento y control se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) de medias en el tiempo (R versión 3.2.2). Se ejecutaron un Análisis de Redundancia (RDA) y un Análisis de Escalamiento Multidimensional no Métrico (MNDS) (R versión 3.2.2) con el objeto de detectar un patrón de ordenación de la comunidad a partir de las variables físicas y químicas y representar las proximidades entre el tratamiento y el control, respectivamente.

RESULTADOS

Caracterización física y química de los canales

El caudal y la velocidad del agua para el conjunto de canales registraron en promedio 0,05 m³ s⁻¹ y 0,03 m s⁻¹ respectivamente (Fig. 1a, 1b). La conductividad fue mayor en los canales tratamiento, que alcanzaron 154,8 μScm⁻¹, mientras que en el control fue de 128,7 μScm⁻¹ (Fig. 1c). Se encontraron diferencias significativas entre ambos tratamientos (N=70, F=120,3, *p*<0,0001 y entre días (N=70, F=36,01, *p*<0,0001).

La concentración de oxígeno disuelto fue mayor en los canales control (6,59 O₂ mgL⁻¹) con respecto a los del tratamiento (6,16 O₂ mgL⁻¹), y se mantuvo con valores similares a lo largo de todo el estudio (Fig. 1d). Se encontraron diferencias significativas entre los dos tratamientos (N=70, F=397,09, *p*<0,0002) y entre días (N=70, F=3,477, *p*=0,0001).

En cuanto al pH se observó una amplia variación de la media diaria a lo largo del experimento (Fig. 1e). A pesar de ello, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (N=70, F=31,617, *p*=0,0003 y entre días (N=70, F=7,727, *p*=0,0002).

En cuanto a los nutrientes, para nitritos, nitratos y fosfatos, se encontraron concentraciones muy bajas (<0,1 mg l⁻¹), y solo se observó variación en el Amonio (0,18 mg l⁻¹-0,23 mg l⁻¹).

La temperatura (variable controlada) presentó, según lo esperado, en promedio un valor de 22,5 °C para los canales tratamiento y de 19,1 °C en los canales control, que fueron constantes a lo largo del estudio (Fig. 1f).

Estructura del ensamble de diatomeas

Se registraron en total 56 especies de diatomeas reunidas en 27 géneros (*Achnanthes*, *Achnantheidium*, *Caloneis*, *Cymbella*,

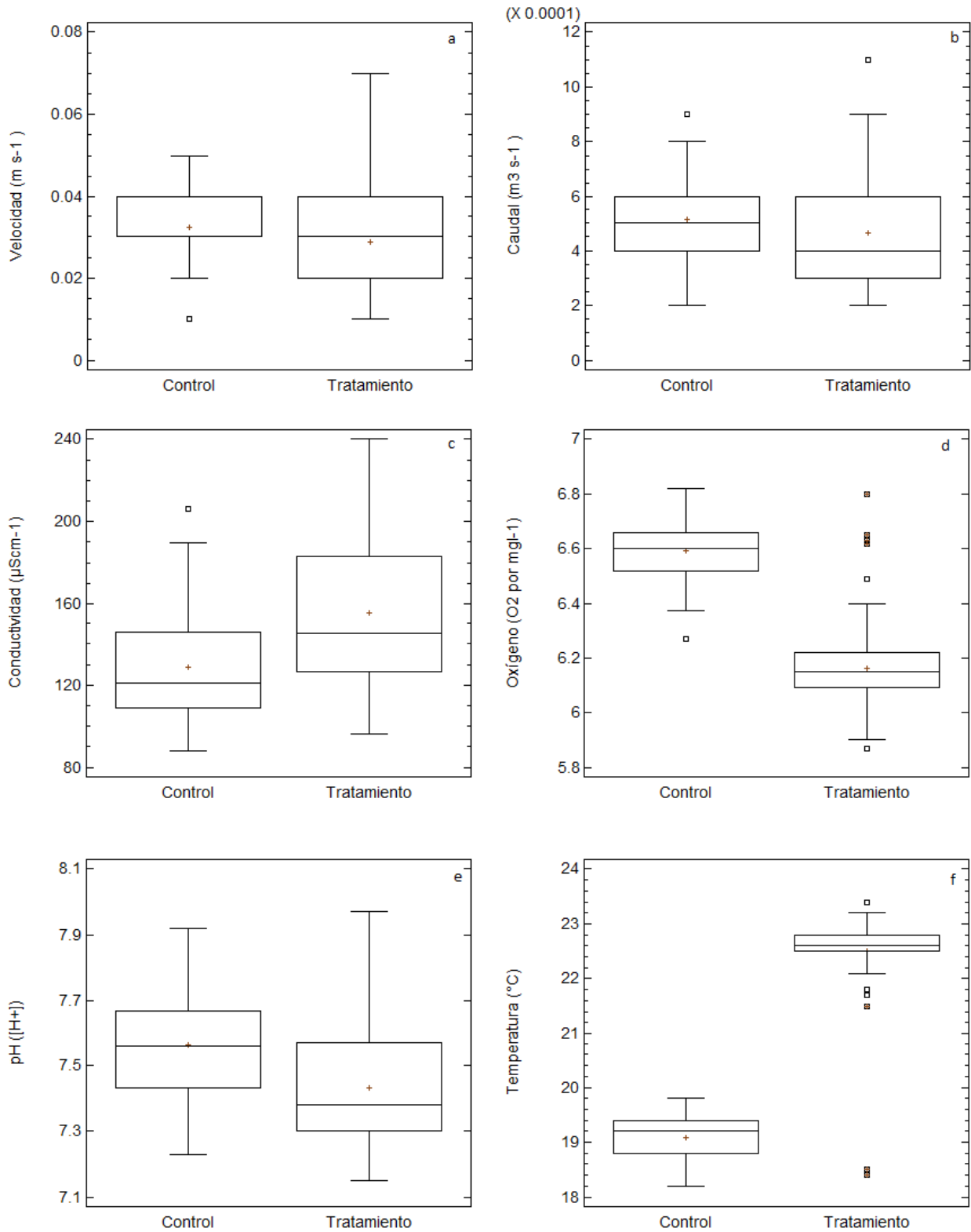


Figura 1. Representación (caja y bigotes) de las medidas por 35 días de velocidad de la corriente (a), caudal (b), conductividad (c), oxígeno disuelto (d), pH (e) y temperatura (f). En los canales control y tratamiento.

Cyclotella, *Cocconeis*, *Diademsis*, *Encyonema*, *Epithemia*, *Fragilaria*, *Frustulia*, *Gomphonema*, *Gyrosigma*, *Hantzschia*, *Luticola*, *Melosira*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Pinnularia*, *Placoneis*, *Reimeria*, *Rhoicosphenia*, *Rhopalodia*, *Stauroneis*, *Surirella*, *Tabellaria* y *Ulnaria*). Aunque ningún género fue exclusivamente dominante durante todo el estudio, algunos se destacaron en diferentes tiempos, siendo *Rhoicosphenia* dominante hasta cerca de la mitad del experimento y luego *Achnanthis* y *Achnanthes* fueron los más representativos.

Los índices de Shannon y Margalef descendieron a lo largo del tiempo, el primero tuvo un promedio de 1,95 en el control y 1,90 en el tratamiento, mientras que el índice de Margalef fue en promedio 3,8 para ambos casos (Fig. 2). Ninguno de los

dos mostró diferencias significativas entre el tratamiento y el control ni el tiempo ($N=36$, $F=0,891$, $p=0,586$ para Shannon y $N=36$, $F=0,704$, $p=0,789$ para Margalef).

Clorofila "a" y Productividad Primaria Bruta

El promedio tanto para el tratamiento como para el control fue de $0,01 \mu\text{gL}^{-1}$. Ambos presentaron aumentos diarios (Fig. 3). No se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento y el control ($N=36$, $F=0,340$, $p=0,992$).

La Productividad Primaria Bruta (PPB) fue extremadamente baja, para los dos casos (tratamiento y control) con promedios de $0,194 \text{ gCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ y $-0,26 \text{ gC}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ respectivamente (Fig. 3).

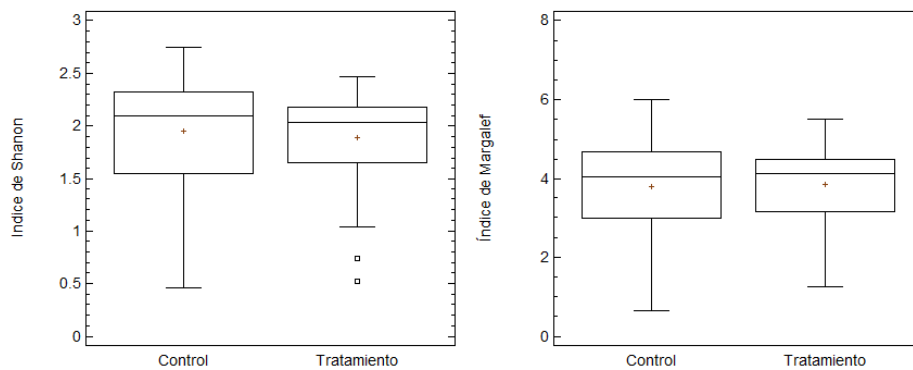


Figura 2. Representación (caja y bigotes) del índice de Shannon (izquierda) y el índice de Margalef (derecha), para canales tratamiento y control.

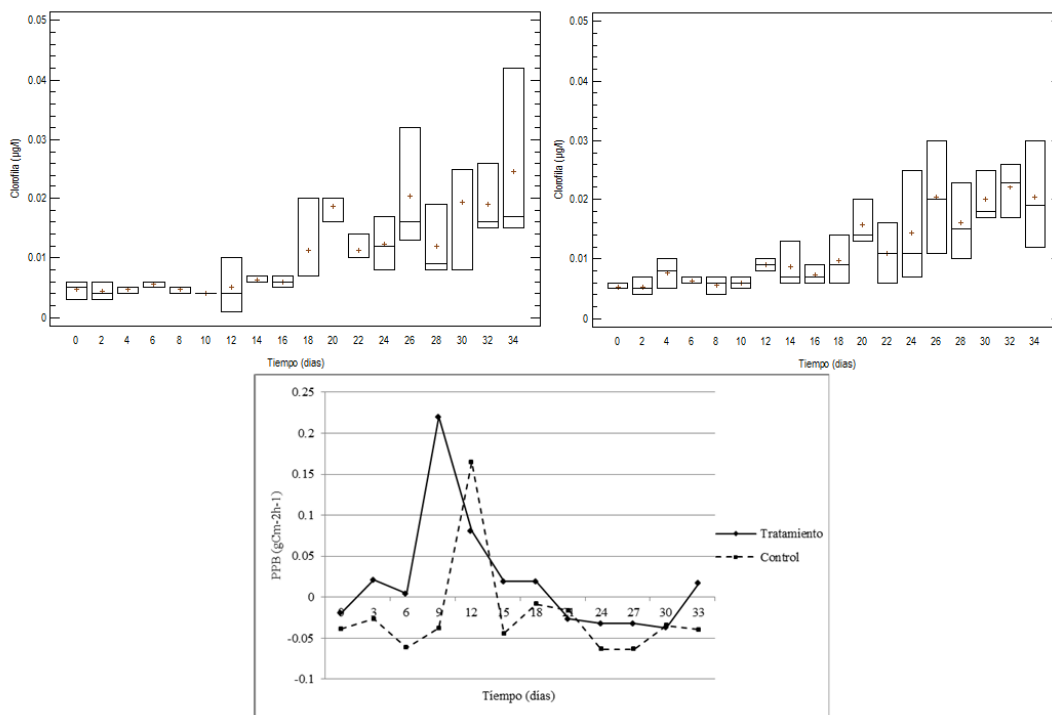


Figura 3. Arriba: Clorofila medida durante 34 días (día de por medio) (izquierda: canales con aumento de temperatura, derecha: canales control) representadas en un gráfico de caja y bigotes, donde la cruz roja representa la media. Abajo: Productividad Primaria Bruta de la Comunidad calculada.

Relación de las variables estudiadas

Se obtuvo un solapamiento entre control y tratamiento para los ensambles de diatomeas, lo que indica que los datos encontrados en cuanto a la densidad de las especies fueron muy próximos entre sí (Fig. 4).

Según indica el RDA, la temperatura no estaría relacionada con la concentración de clorofila. Tampoco se encontró

relación entre las variables fisicoquímicas y las especies más representativas de diatomeas, con excepción de la relación inversa que mostraron la temperatura y el oxígeno, de igual forma, no hay tendencia alguna con respecto a los muestreos de los canales control y tratamiento (Fig. 5).

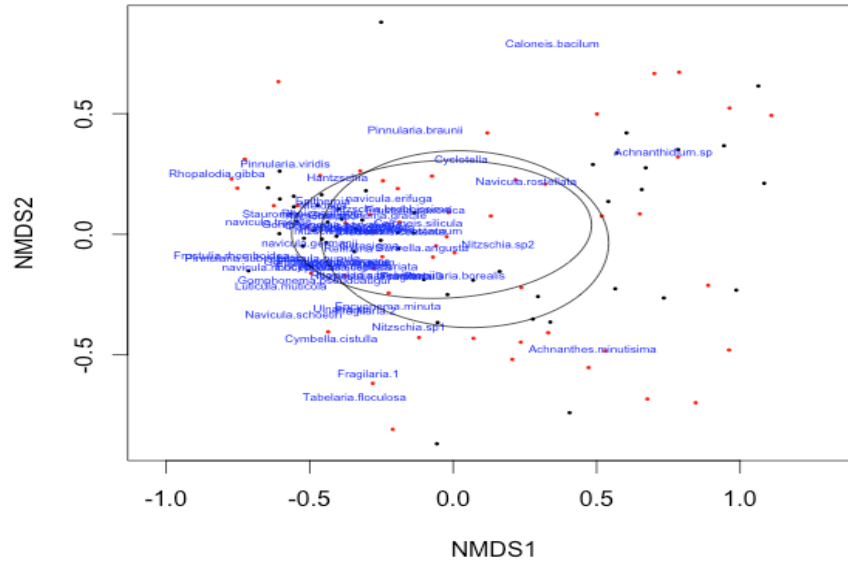


Figura 4. Análisis multidimensional no-métrico (NMDS) entre las diferentes variables medidas en el estudio.

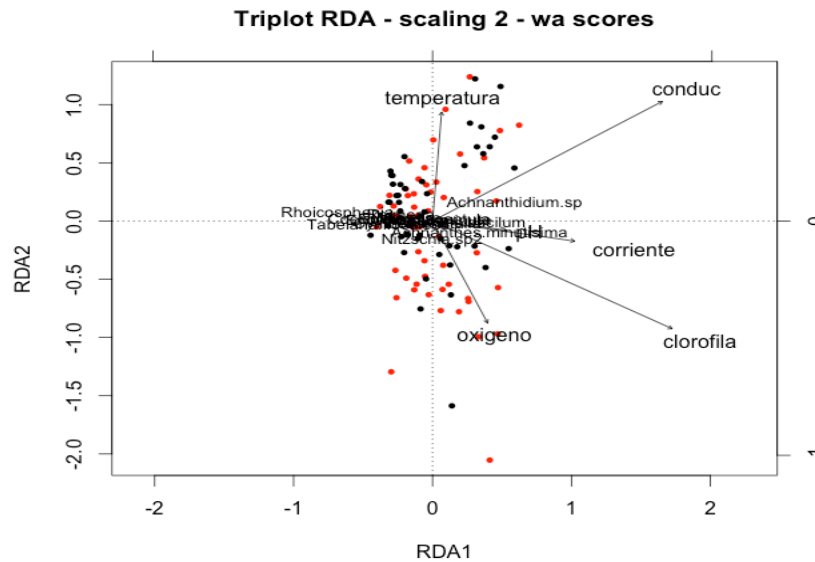


Figura 5. Análisis de redundancia (RDA) con las 13 especies más representativas.

DISCUSIÓN

El sistema de canales de recirculación y las cámaras recirculantes de metabolismo, que fueron diseñados para este experimento, son los primeros realizados para Colombia, lo que se traduce en un importante avance para estudios

experimentales *ex situ*. Sistemas como este han sido usados en diferentes estudios (Hogg y Williams, 1996; Canhoto *et al.*, 2013; Ferreira y Canhoto, 2014). El sistema de calentamiento probó ser eficiente en el aumento de la temperatura del agua de 2 a 4 °C por encima de la temperatura control.

El oxígeno disuelto y el pH, aunque presentaron diferencias entre los tratamientos y los días de muestreo, no sugieren un patrón de respuesta en particular durante el experimento, la diferencia del oxígeno se debe fundamentalmente a la disminución de su saturación con el aumento de temperatura. La conductividad aumentó diariamente, pero de forma más notable en el tratamiento, lo que puede ser un indicador indirecto de diferencias en el metabolismo y la diversidad de la comunidad algal (Roldán, 2003; Roldán y Ramírez, 2008).

Los nutrientes, presentaron niveles bajos debido a la demanda de la comunidad algal y a la ausencia de material alóctono y fuentes de contaminación que se dan en el estado natural del río, ya que hay una alta presencia de áreas con intervención antrópica destinadas para actividades agropecuarias (Castro y Donato, 2008).

Cambios leves en las abundancias relativas de las especies fueron reportadas experimentalmente, sin embargo, no se pudo probar diferencias significativas entre el tratamiento y el control. Es muy posible que estos cambios estén asociados a la sucesión o a la colonización azarosa de los substratos. En general se presentó una baja diversidad y riqueza algal, con dominancia de una especie, también reportado en condiciones naturales para el río Tota (Rivera y Donato, 2008; Pedraza y Donato, 2011).

De acuerdo al RDA la composición de los ensambles de diatomeas no estuvo relacionada con la temperatura. Resultados similares se han encontrado en estudios con metodología de aumento de temperatura en canales, para el caso de los macroinvertebrados. Hogg y Williams (1996), no encontraron relaciones con el aumento de temperatura, aunque asociaron respuestas halladas a las historias de vida de los organismos, mientras que Friberg *et al.* (2009) en un escenario de diferencia de temperatura en un rango mayor (de 6 a 23°C), encontraron cambios en la estructura y diversidad de la comunidad de macroinvertebrados. Por otra parte, Jacobsen *et al.* (1997) reportaron un aumento de la riqueza de insectos en condiciones de incremento de temperatura en arroyos templados y tropicales.

Los valores de clorofila mostraron respuestas cualitativas, que deben considerarse en estudios *a posteriori*.

La productividad primaria resultante de las mediciones de metabolismo fue negativa, lo que evidencia un sistema fundamentalmente heterótrofo como se ha reportado para ríos tropicales de alta montaña (Rodríguez, 2011).

CONCLUSIONES

En cuanto a la hipótesis planteada, no se demostraron diferencias estadísticamente significativas en las respuestas de los ensambles de diatomeas, productividad y clorofila asociadas con la temperatura. Aunque no hubo una incidencia directa de la temperatura a nivel algal, si se encontró una variación del pH, la conductividad y el oxígeno disuelto en los canales tratamiento. El trabajo experimental realizado es un aporte que sienta bases para el estudio del

impacto que tendría un aumento de temperatura sobre los sistemas lóticos de alta montaña en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Banco de la República- Fundación para la promoción de la Investigación y la tecnología, por el financiamiento del proyecto. A la Universidad Nacional de Colombia y su facultad de Ciencias por los espacios, equipos y condiciones óptimas que permitieron el desarrollo del proyecto. A los profesores Gabriel Pinilla, Jairo Guerrero y Luis Carlos Montenegro. A Juan David González, Edna Pedraza, Paulo Pulido, Carmen Mosquera y Juan Carlos Rubiano por su colaboración y disposición. Al Laboratorio de Análisis de Residuos de Plaguicidas del Departamento de Química y al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. A la Universidad de Girona (España) por hacer parte importante del desarrollo del experimento. Al señor German Díaz y Manuel Céspedes, por la elaboración de los canales y cámaras de metabolismo de metacrilato.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCIAS

- Acuña V, Guasch H, Giordi A, Izagirre O. Flujo de energía en el ecosistema. Metabolismo fluvial. In: Elosegi A, Sabater S, editors. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Bilbao: Rubes editores; 2009. p. 367-375.
- Acuña V, Vilches C, Giorgi A. As productive and slow as a stream can be—the metabolism of a Pampean stream. *J N Am Benthol Soc.* 2011;30(1):71-83. Doi:10.1899/09-082.1
- American Public Health Association (APHA). Standard methods for examination of water and wastewater. 17th ed. Washington: Amer. Pub. Heal. Assoc.; 1989. p.1536.
- American Public Health Association (APHA). Standard methods for examination of water and wastewater. 19th ed. Washington: Amer. Pub. Heal. Assoc.;1998. p. 1536.
- Boix D, García E, Gascón S, Benejam L, Tornes E, *et al.* Response of community structure to sustain drought in Mediterranean rivers. *J Hydrol.* 2010;383:135-146. Doi:10.1016/j.jhydrol.2010.01.014
- Canhoto C, de Lima J, de Almeida A. Warming up a stream reach: design of a hydraulic and heating system. *Limnol Oceanogr Methods.* 2013;11:410-417. Doi:10.4319/lom.2013.11.410
- Castro M, Donato J. El entorno del río Tota. In: Donato J, editor. Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos. Bogotá, Colombia: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. 2008. p. 73-79.
- Ferreira V, Canhoto C. Effect of experimental and seasonal warming on litter decomposition in a temperate stream. *Aqua Sci.* 2014;76(2):155-163. Doi:10.1007/s00027-013-0322-7

- Friberg N, Dybkjær J, Olafsson J, Gislason G, Larsen S, Lauridsen T. Relationships between structure and function in streams contrasting in temperature. *Freshwater Biol.* 2009;54:2051-2068. Doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02234.x
- Gillooly JF, Charnov EL, West GB, Savage VM, Brown JH. Effects of size and temperature on developmental time. *Nature.* 2002;417:70-73. Doi:10.1038/417070a
- Gómez N, Donato J, Giorgi A, Guasch H, Mateo P, Sabater S. La biota de los ríos: los microorganismos autótrofos. In: Elosegí A, Sabater S, editors. *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Rubes editores; 2009. p. 219-242.
- Hogg I, Williams D. Response of stream invertebrates to a global-warming thermal regime: An ecosystem-level manipulation. *Ecol Soc Amer.* 1996;77(2):395-407. Doi:10.2307/2265617
- IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC; 2007. p. 104.
- Jacobsen D, Schultz R, Encalada A. Structure and diversity of stream macroinvertebrates assemblages: the effect of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biol.* 1997;38:247-261. Doi:10.1046/j.1365-2427.1997.00210.x
- Kelly M. *Identification of benthic diatoms in rivers*. Shrewsbury: Field Studies Council; 2000. 117 p.
- Kramer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 1, Teil: Naviculaceae. In: Ettl H, Gerloff J, Heynig H, Mollenhauer D, editors. *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1986. 876 p.
- Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 4, Teil: Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4. In: Ettl H, Gerloff J, Heynig H, Mollenhauer D, editors. *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/4*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1991a. 437 p.
- Krammer K, Lange-Bertalot H. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae 3, Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Ettl H, Gerloff J, Heynig H, Mollenhauer D, editors. *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/3*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1991b. 576 p.
- Kromkamp J, Forster R. The use of variable fluorescence measurement in aquatic ecosystems: differences between multiple and single turnover measuring protocols and suggested terminology. *Eur J Phycol.* 2003;38:103-112. Doi:10.1080/0967026031000094094
- Mathews A, Ewann B. *Turning Up the Heat: How Global Warming Threatens Life in the Sea*. Washington, D.C: World Wildlife Fund; 1999. 47 p.
- Mendoza H, Bautista G. *Diseño Experimental*. Universidad Nacional de Colombia, 2002. Available at: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/>. [Cited 01st March 2016].
- Metzeltin D, Lange-Bertalot H. *Tropical Diatoms of South America I. Iconographia Diatomologica Annotated Diatom Micrographs*. Vol 5. Stuttgart: Koeltz Scientific Books; 1998. 695 p.
- Pedraza E, Donato J. Diversidad y distribución de diatomeas en un arroyo de montaña de los Andes Colombianos. *Caldasia.* 2011;33(1):177-191.
- Rivera C, Donato J. Influencia de las variaciones hidrológicas y químicas sobre la diversidad de diatomeas bénticas. In: Donato J, editor. *Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos (río Tota, Boyacá)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 2008. p. 83-102.
- Roldán G. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/Col. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. Colección de Ciencia y Tecnología; 2003. 175 p.
- Roldán G, Ramírez J. *Fundamentos de limnología neotropical*. 2da edición. Rio Negro, Colombia; Editorial Universidad de Antioquia; 2008. 440 p.
- Rodríguez J. *Descriptores funcionales de ecosistemas lóticos en un río tropical y su vegetación riparia*. Santa Marta, Colombia (tesis de doctorado). Bogotá, Universidad Nacional de Colombia; 2011.
- Sabater S, Elosegí A, Acuña V, Basaguren A, Muñoz I, Pozo J. Effect of climate on the trophic structure of temperate forested streams. A comparison of Mediterranean and Atlantic streams. *Sci Total Environ.* 2008;390:475-484. Doi:10.1016/j.scitotenv.2007.10.030
- Sabater S, Donato J, Giorgi A, Elosegí A. El río como ecosistema. In: Elosegí A, Sabater, editors. *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Rubes editores; 2009. p. 23-37.
- Vasseur D, McCann K. A mechanistic approach for modeling temperature-dependent consumer-resource dynamics. *Am Nat.* 2005;166:184-198. Doi:10.1086/431285
- Vuille M, Francou B, Wagnon P, Juen I, Kaser G, Mark B, *et al.* Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Rev.* 2008;89(3-4):79-96. Doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Walther G, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T, *et al.* Ecological responses to recent climate change. *Nature.* 2002;416:389-395. Doi:10.1038/416389a
- Young R, Huryn A. Longitudinal patterns of organic matter transport and turnover along a New Zealand grassland river. *Freshwater Biol.* 1997;38:93-107. Doi:10.1046/j.1365-2427.1997.00196.x