

ORIGINAL

Ecological quality index using periphytic algae in San Juan river (Antioquia-Colombia)

Índice de calidad ecológico empleando algas perifíticas en un tramo del río San Juan (Antioquia-Colombia)

Esnedy Hernández A^{1*} Ph.D; Robinson Sepúlveda S¹ Ing Amb; Heazel Grajales V¹ Ph.D;
Néstor Aguirre R¹ Ph.D; Fabio Vélez M¹ M.Sc; Orlando Caicedo Q¹ Biól;
Jenny Mesa V² Ing Agrón; Fernando Cortés D² Ing Agrón; Yimmy Montoya M¹ Ph.D.

¹University of Antioquia, Faculty of Engineering, Department of Sanitary and Environmental Engineering: Environmental School, GeoLimna Research Group. Calle 67 N°53-108 Block 20 Office 422. Medellín, Colombia. ²University of Antioquia, Southwest section, Andes, Antioquia, Colombia. *Correspondence: esnedynhernandez@udea.edu.co

Received: August 2017; Accepted: July 2018.

ABSTRACT

Objective. This work evaluated the environmental condition of a section of the San Juan River by means of the ecological quality index (ICE), using as an indicator group the periphytic algae. **Materials and methods.** The method determined correlations between physicochemical and biological variables through a canonical correspondence analysis, the scores obtained were used in a standardized correlation for a weighted averages model that allowed estimating the optimum and the tolerance of each taxon. **Results.** The classification of the sites located in the section of the River using the ICE explained that the concentrations of dissolved solids, alkalinity and orthophosphates defined the categories of ecological status, it was identified that at higher concentrations of dissolved solids and orthophosphates and at lower concentrations of the alkalinity values of the ICE were lower, that is to say, the ecological quality of the periphytic algae decreases, this situation took place in two seasons characterized by turbid waters and anthropic intervention. In contrast, another group tended to register the contrary tendencies, a greater concentration of alkalinity and high values in the index. **Conclusions.** The index provided an objective response to evaluate in numerical form a gradient associated with the concentration of solids, nutrients and alkalinity, variables that affect the distribution of optimal values and tolerance of the periphytic algae to the physicochemical conditions evaluated by the ICE in a stretch of the San Juan River, the results suggest a progressive deterioration of the system from the headwaters to the mouth of the Cauca River.

Keywords: Bioindicators; diagnostic; environmental management; limnology; monitoring; optimum (Source: *Tesaurus Ambiental para Colombia*)

RESUMEN

Objetivo. Este trabajo evaluó la condición ambiental de un tramo del río San Juan por medio del índice de calidad ecológico (ICE) usando como grupo indicador las algas perifíticas. **Materiales y método.** El método determinó un gradiente ambiental a partir de correlaciones entre variables fisicoquímicas y abundancia a través de un análisis de correspondencias canónicas, las puntuaciones obtenidas en cada punto de muestreo se utilizaron en una correlación estandarizada para un modelo de promedios ponderados (WA) que finalmente permitieron estimar el óptimo y la tolerancia de cada taxón. **Resultados.** El agrupamiento determinó tres conjuntos, uno de ellos reunió estaciones y períodos con mayores valores medios de sólidos disueltos y ortofosfatos y menores en cuanto a la alcalinidad y ICESJ-Alg, a este grupo se asociaron la

estación 2 (Quebrada la Chaparrala) y la estación 5 (Sitio Remolinos), ambos sitios se caracterizan por aguas turbias e intervención antrópica. En contraste, otro grupo tendió a registrar las tendencias contrarias, es decir, tendencia a mayores valores de la alcalinidad y el índice, características de la estación 1 (Charco corazón, sitio caracterizado por aguas claras con reducida intervención antrópica). La clasificación de los sitios ubicados en el tramo del Río usando el ICE explicó que las concentraciones de los sólidos disueltos, la alcalinidad y los ortofosfatos definieron las categorías de estado ecológico, se identificó que a mayores concentraciones de sólidos disueltos y ortofosfatos y a menores concentraciones de la alcalinidad el ICESJ-Alg es menor, es decir la calidad ecológica de las algas perifíticas disminuye. **Conclusiones.** El índice brindó una respuesta objetiva y rigurosa para evaluar en forma numérica la posición de cada una de las estaciones del tramo del Río San Juan basada en la biota y variables fisicoquímicas propias del sistema.

Palabras Clave: Bioindicadores; diagnóstico; gestión ambiental; limnología; monitoreo; óptimo (*Fuente: Tesauro Ambiental para Colombia*).

INTRODUCTION

Due to its latitudinal location influenced by the intertropical convergence zone, the geographical relief associated with the Andes mountain range and consequently the variety of climates and environments, Colombia presents water basins that are influenced by different anthropic uses such as livestock, mining and agriculture. In this framework, the research, diagnosis and management of aquatic ecosystems in Colombia is of interest to the academic and governmental associations, specifically the Ministry of Environment and Sustainable Development directs the guidelines and technical instructions to develop this work through the water management plans and watershed management plans.

Currently, the national legislation includes in several environmental decrees associated with the diagnosis of the quality of ecosystems, especially their supply and demand in order to study the capacity of environmental services, among the most important is the National Code of Natural Resources. Renewables and Protection of the Environment, Decree - Law 2811 of 1974; Law 99 of 1993 on the general guidelines for the management and management of watersheds and the figure of the water resources management as a planning instrument issued in October 2010 in Decree 3930. Recently, the first edition of the Technical Guide for the Formulation of Water Resource Management Plans-2014, presents in its diagnostic phase the determination of different quality indicators, including the ecological analysis of two hydrobiological groups, macroinvertebrates and periphytic algae; among the numerical indicators applicable to these groups is the Ecological Quality Index, which represents a proposal for an integral vision in the implementation of pilot methodologies for the planning and administration of water resources.

The ecological quality index analyzes the subordination of the abundance of organisms with respect to the environmental variables Haase and

INTRODUCCIÓN

Debido a su ubicación latitudinal influenciada por la zona de convergencia intertropical, el relieve geográfico asociado a la cordillera de los Andes y en consecuencia la variedad de climas y ambientes, Colombia presenta cuencas hídricas que son influenciados por diferentes usos antrópicos como la ganadería, la minería y la agricultura. En este marco la investigación, diagnóstico y gestión de ecosistemas acuáticos en Colombia es interés del gremio académico y gubernamental, específicamente el ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible dirige las directrices e instrucciones técnicas para desarrollar esta labor por medio de los planes de ordenamiento hídrico y los planes de ordenamiento de cuencas.

Actualmente, la legislación nacional incluye en varios decretos ambientales asociados al diagnóstico de la calidad de los ecosistemas, especialmente su oferta y demanda con el fin de estudiar la capacidad de los servicios ambientales, entre los más importantes se encuentra el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Decreto - Ley 2811 de 1974; la Ley 99 de 1993 sobre las pautas generales para el ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas y la figura del ordenamiento del recurso hídrico como instrumento de planificación expedida en octubre de 2010 en el Decreto 3930. Recientemente, la primera edición de la Guía Técnica para La Formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico-año 2014, presenta en su fase de diagnóstico la determinación de diferentes indicadores de calidad, entre ellos el análisis ecológico de dos grupos hidrobiológicos, los macroinvertebrados y las algas perifíticas; entre los indicadores numéricos aplicables a estos grupos se encuentra el Índice de Calidad Ecológico, el cual representa una propuesta de visión integral en la implementación de metodologías piloto para la planificación y administración del recurso hídrico.

El índice de calidad ecológico analiza la subordinación de la abundancia de los organismos con respecto a las variables ambientales Haase y Nolte (1),

Nolte (1), in this case, the group selected were the periphytic algae, which in the company of fungi and bacteria live attached to substrates alive or inert immersed in the currents.

The method is not conditioned to a system or to a specific group of organisms, in this case applied to the periphytic algae. The index allows to quantitatively establish optimal and tolerance values of the species in response to the degree of correlation between the abundances and the environmental gradient as described in the works of Haase and Nolte (1), Chalar et al (2), Forero et al (3).

The inclusion of this type of methodologies in the recent technical guide of the water management plans, intends that the estates in charge of the environmental ordering of a territory, in this case study of the southwest of the department of Antioquia, obtain the possibility of analyzing by means of indicators robust the supply and quality of water in interaction with environmental services such as the agricultural frontier, the prospecting of hydroelectric plants and the viability of environmental licenses for mining extraction.

In particular, in the San Juan River basin, the agricultural extension associated with the cultivation of coffee and the dumping of wastewater without any treatment aggravate water management. Currently and in the future this type of activities are linked to the economy of the region and for this reason the diagnosis and integral management of the water resources of the San Juan River and in general of the rivers with similar problems in Colombia represents a transversal issue of academic and governmental interest. It is for this reason that the monitoring of physicochemical and hydrobiological variables is fundamental to analyze water quality and an efficient method to identify and quantify the magnitude of the disturbances (4).

This research presents the application of a comprehensive tool to analyze the water quality of the San Juan River, using as an indicator group the periphytic algae, the evaluation contemplates sites from the source to the mouth of the Cauca River and intends to analyze how the biological domain correlates. and some physicochemical variables through the ecological quality index, so it is expected that if it is a useful methodology it will expose environmental conditions that are valuable in the management of the San Juan river.

The Ecological Quality Index was previously tested in Colombia by means of aquatic macroinvertebrates for the Río Negro basin by Forero et al (3) and is currently suggested as a pilot diagnostic strategy in the guide of water management plans of the

en este caso, el grupo seleccionado fueron las algas perifíticas, que en compañía de hongos y bacterias viven adheridos a sustratos vivos o inertes inmersos en las corrientes.

El método no se encuentra condicionado a un sistema ni a un grupo de organismos específico, en este caso aplicado a las algas perifíticas. El índice permite establecer cuantitativamente valores óptimos y de tolerancia de las especies en respuesta al grado de correlación entre las abundancias y el gradiente ambiental tal como se describe en los trabajos de Haase y Nolte (1), Chalar et al (2), Forero et al (3).

La inclusión de éste tipo de metodologías en la reciente guía técnica de los planes de ordenamiento hídrico, pretende que los estamentos encargados del ordenamiento ambiental de un territorio, en este caso de estudio el suroeste del departamento de Antioquia, obtengan la posibilidad de analizar mediante indicadores robustos la oferta y calidad del agua en interacción con los servicios ambientales como la frontera agrícola, la prospección de hidroeléctricas y la viabilidad de licencias ambientales para extracción minera.

En particular en la cuenca del río San Juan la extensión agrícola asociada al cultivo del café y el vertimiento de aguas residuales sin ningún tratamiento agudizan el ordenamiento hídrico. Actualmente y en el futuro este tipo de actividades están ligados a la economía de la región y por esta razón el diagnóstico y la gestión integral de los recursos hídricos del río San Juan y en general de los ríos con problemáticas similares en Colombia representa un tema transversal de interés académico y el gubernamental. Por esta razón el monitoreo de variables fisicoquímicas e hidrobiológicas es fundamental para analizar la calidad del agua y un método eficiente para identificar y cuantificar la magnitud de las perturbaciones es pertinente (4).

Esta investigación presenta la aplicación de una herramienta integral para analizar la calidad del agua del río San Juan usando como grupo indicador las algas perifíticas, la evaluación contempla sitios desde el nacimiento hasta la desembocadura al río Cauca y pretende analizar cómo se correlacionan el dominio biológico-ficoperifítico y algunas variables fisicoquímicas por medio del índice de calidad ecológico, por lo cual se espera que en caso de ser una metodología útil exponga condicionantes ambientales que sean valiosas en la gestión del río San Juan.

El Índice de calidad ecológica fue probado previamente en Colombia por medio de macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (3) y actualmente es sugerido como estrategia piloto de diagnóstico en la guía de planes de ordenamiento hídrico del ministerio de medio ambiente. En esta investigación se entregan los

Ministry of Environment. In this research, the first results of this index are given using as an indicator group the periphytic algae and has the objective of evaluating the environmental condition of a section of the San Juan River by means of the ecological quality index to detect the environmental conditions that affect the adequacy biological of the organisms in the system and consequently the state of the ecological scenario.

MATERIALS AND METHODS

Study area. The San Juan River basin is located in the Southwest region of the department of Antioquia and includes areas of the municipalities of Andes, Jardín, Bolívar, Salgar, Hispania and Betania, whose municipal capitals are in its area. It has an approximate extension of 1819 Km² and its main current, the San Juan River, is oriented in a South-North direction, it starts in the Farallones del Citará and flows into the Cauca River. The rain regime of the region is bimodal, characterized by two dry seasons, between the months of December and March and June and July. The sites were monitored in February, May, August and October 2014 according to Aguirre et al (5).

The sampling stations were selected with the intention of detecting possible changes in the environmental dynamics along the River from little intervention sites until their mouth with the Cauca River, in this way 6 stations were located (Figure 1): Station 1: Charco Corazón (N 5° 35' 12.57" W 75° 48' 44.78"), located in the municipality of Jardín, upper part of the San Juan River basin at 1851 meters, a site characterized by clear waters with little flow and reduced anthropic intervention. 2: Quebrada La Chaparrala (N 5° 38' 58.52", O 75° 52' 28.79") municipality of Andes, located before the mouth of the San Juan River at 1296 m above sea level, characterized by intermediate flow, turbid waters and anthropic intervention that includes agricultural and domestic shedding; Station 3: Comfenalco site (N 5° 41' 20.35", O 75° 52' 37.54"), Andes municipality near the town center at 1215 m above sea level. Station 4 (N 5° 41' 26.28", O 75° 52' 44.00") located near the University of Antioquia, municipality of Andes at 1224 m above sea level. Station 5: Remolinos site (N 5° 50' 51.80" O 75° 54' 54.26") upstream from the mouth of the Río Bolívar to the San Juan River at 700 meters above sea level. Station 6: Peñalisa Site (N 5° 55' 57.07", O 75° 51' 35.14") before the mouth of the San Juan River to the Cauca River at 571 m above sea level, in these last three sites the River is mighty, with turbid waters and the influence of vertimientos of domestic and agricultural origin, especially associated with the cultivation of coffee, intensifies.

Environmental variables. In each station and sampling, the measurement of variables such as ambient temperature and water (°C), dissolved

primeros resultados de este índice usando como grupo indicador las algas perifíticas y tiene el objetivo de evaluar la condición ambiental de un tramo del río San Juan por medio del índice de calidad ecológico para detectar los condicionantes ambientales que afectan la adecuación biológica de los organismos en el sistema y en consecuencia el estado del escenario ecológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La cuenca del río San Juan se ubica en la región Suroeste del departamento de Antioquia e incluye áreas de los municipios de Andes, Jardín, Bolívar, Salgar, Hispania y Betania, cuyas cabeceras municipales se encuentran en su área vertiente. Tiene una extensión aproximada de 1819 Km² y su corriente principal, el río San Juan, se orienta en sentido Sur-Norte, nace en los Farallones del Citará y desemboca en el río Cauca. El régimen pluvial de la región es bimodal, caracterizado por dos épocas secas, comprendidas entre los meses de diciembre y marzo y junio y julio. Los sitios fueron monitoreados en febrero, mayo, agosto y octubre de 2014 (5).

Las estaciones de muestreo fueron seleccionadas con la intención de detectar posibles cambios en la dinámica ambiental a lo largo del río desde sitios poco intervenidos hasta su desembocadura con el río Cauca, de este modo se localizaron 6 estaciones (Figura 1): Estación 1: Charco Corazón (N 5° 35' 12.57" O 75° 48' 44.78), localizado en el municipio de Jardín parte alta de la cuenca del río San Juan a 1851 msnm, sitio caracterizado por aguas claras con poco caudal y reducida intervención antrópica. Estación 2: Quebrada la Chaparrala (N 5° 38' 58.52", O 75° 52' 28.79») municipio de Andes, localizado antes de la desembocadura al río San Juan a 1296 msnm, caracterizado por importante aumento del caudal, aguas turbias e intervención antrópica que incluye vertimientos veredales de tipo agrícola y doméstico. Estación 3: Sede Comfenalco (N 5° 41' 20.35", O 75° 52' 37.54"), municipio de Andes cercano al casco urbano a 1215 msnm. Estación 4 (N 5° 41' 26.28", O 75° 52' 44.00") ubicado cerca a la Sede de la Universidad de Antioquia, municipio de Andes a 1224 msnm. Estación 5: Sitio Remolinos (N 5° 50' 51.80", O 75° 54' 54.26") aguas arriba de la desembocadura del río Bolívar al río San Juan a 700 msnm. Estación 6: Sitio Peñalisa (N 5° 55' 57.07", O 75° 51' 35.14") antes de la desembocadura del río San Juan al río Cauca a 571 msnm, en estos tres últimos sitios el río continúa siendo caudaloso, con aguas turbias y se intensifica la influencia de vertimientos de origen doméstico y agrícola, especialmente asociado al cultivo de café.

Variables ambientales. En cada estación y muestreo la medida de variables como temperatura ambiente y del agua (°C), oxígeno disuelto (mg/L), pH, Conductividad eléctrica (µS/cm) y sólidos

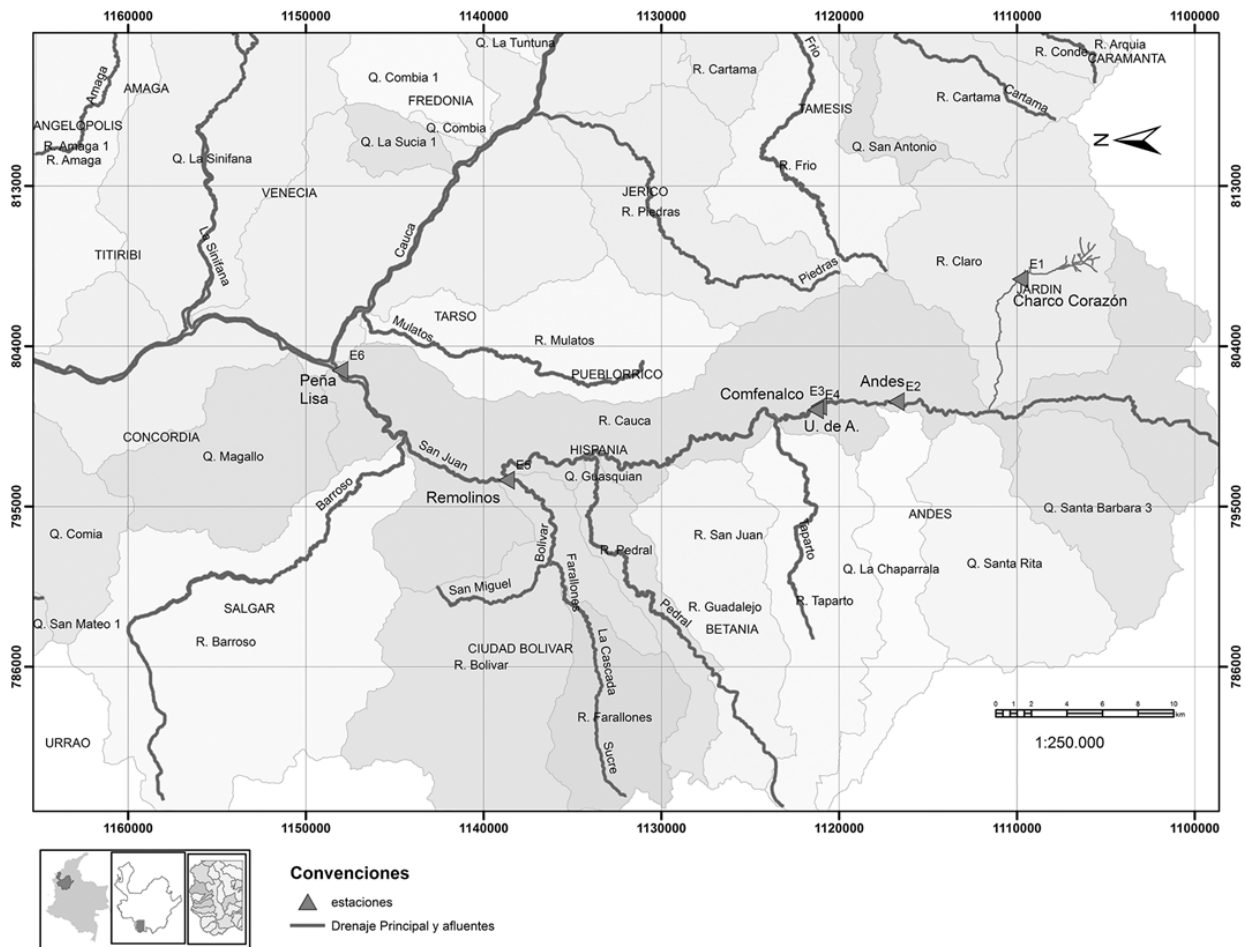


Figure 1. Location of the six monitoring stations on the San Juan River (see triangles symbols).

oxygen (mg/L), pH, electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) and dissolved solids (mg/L) was carried out using in situ sensors. For the determination of chemical oxygen demand (mg/L O_2), turbidity (NTU), alkalinity and total hardness (mg/L CaCO_3) and nutrient concentrations: total nitrogen, nitrites, nitrates, ammonia nitrogen, total phosphorus and orthophosphates, all of them in (mg/L), a sample of water was obtained from each site in opaque plastic containers of 500 mL, immediately after its collection, the samples were refrigerated and processed in less than 3 hours in the Southwest Section of the University of Antioquia in the municipality of Andes using multiparametric cells and a photometer.

Periphytic algae collection. To carry out the sampling of phytoperiphitic samples in each of the sampling points, the removal was done by means of plastic brushes of the material adhered to substrates (stones, trunks, litter) immersed in the bed of the stream, as a unit of area was used

disueltos (mg/L) fue realizada mediante sensores *in situ*. Para la determinación de la demanda química de oxígeno (mg/L O_2), turbidez (NTU), alcalinidad y dureza total (mg/L CaCO_3) y las concentraciones de nutrientes: nitrógeno total, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, fósforo total y ortofosfatos, todos ellos en (mg/L), se obtuvo una muestra de agua de cada sitio en recipientes plásticos opacos de 500 mL, inmediatamente después de su colecta, las muestras fueron refrigeradas y procesadas en menos de 3 horas en la Seccional Suroeste de la Universidad de Antioquia en el municipio de Andes empleando celdas multiparamétricas y un fotómetro.

Colecta de algas perifíticas. Para efectuar la toma de muestras ficoperifíticas en cada uno de los puntos de muestreo se realizó la remoción por medio de cepillos plásticos del material adherido a sustratos (piedras, troncos, hojarasca) inmersos en el lecho de la corriente, como unidad de área se utilizó la disposición de un cuadrante de 8cm^2 por 30 veces en las seis estaciones. La muestra

the arrangement of an 8cm² quadrant for 30 times in the six seasons. The collected sample was fixed with a solution of lugol 10% and transported to the sanitary hydrobiology laboratory of the University of Antioquia.

Laboratory analysis. Observation of the samples of periphytic algae was done with an inverted microscope and a Sedgwick Rafter counting chamber of 1 ml capacity. The density of algae per unit volume was determined according to the methodology used in Hernández et al (6). The count was performed with a total magnification of 400X and the effectiveness of the count was standardized by rarefaction curves. The taxonomic determination was made by a specialist and was based on specialized works in diatoms such as the work of Montoya et al (7).

Ecological quality index. The methods described in Haase and Nolte (1), Chalar et al (2), Forero et al (3) were used as reference, this execution includes four stages in which the quality weighting for each station is determined. 1) The environmental gradient and a linear direct relationship analysis (RDA redundancy analysis) or unimodal analysis (Canonical Correspondence Analysis, ACC) was obtained, depending on the case and following the recommendations in Vrugt et al (8). The data submitted correspond to the abundances of the periphytic algae and the records of the physicochemical variables, both matrices were standardized following the method of Manjarres et al (9). Spearman correlations were made prior to this analysis between physicochemical variables in order to avoid redundancy. 2) the scores of the stations (sample scores) obtained from the first axis of the RDA or the ACC were performed, this step dimensioned the data at a scale between one and ten using a linear regression formulated from the maximum and minimum values of the scores on the first axis. 3) In program C2 (free software) the optimal and tolerance scores for each organism were obtained from a weighted averaging analysis (WA) using the abundances of the algae and the scaled data obtained in the previous step. These scores were associated to the equation of the index described in Haase and Nolte (1), indicating $ICE = (\sum O_{pi} * T_{li} * A_{bi}) / ((\sum O_{pi} * T_{li} * A_{bi}))$, where (O_{pi}) is the optimal value, (T_{li}) the tolerance value and (A_{bi}) the abundance. Finally 4) To establish the ranges of the index categories and the indicator physicochemical variable, a Ward grouping and Euclidean distance was executed. An extension of the methodological aspects can be found in the guide of water management plans for the year 2014.

colectada fue fijada con una solución de lugol al 10% y transportada al laboratorio de hidrobiología sanitaria de la Universidad de Antioquia.

Análisis de laboratorio. La observación de las muestras de algas perifíticas se realizó con un microscopio invertido y una cámara de conteo de Sedgwick Rafter de 1 ml de capacidad. La densidad de algas por unidad de volumen fue determinada según la metodología usada en Hernández et al (6). El conteo se realizó con una magnificación total de 400X y la efectividad del conteo fue estandarizada por curvas de rarefacción. La determinación taxonómica fue realizada por un especialista y se basó en trabajos especializados en diatomeas como el trabajo de Moreno et al (7).

Índice de Calidad Ecológico. Se usó como referencia los métodos descritos en Haase y Nolte (1), Chalar et al (2), Forero et al (3), esta ejecución incluye cuatro etapas en la que se determina la ponderación de calidad para cada estación. 1) Se obtuvo el gradiente ambiental y un análisis de relación directa lineal (análisis de redundancia RDA) o unimodal (Análisis de Correspondencia Canónica, ACC) según sea el caso y atendiendo las recomendaciones en Vrugt et al (8); los datos sometidos corresponden a las abundancias de las algas perifíticas y los registros de las variables fisicoquímicas, ambas matrices fueron estandarizadas siguiendo el método de Manjarres et al (9). Previo a este análisis se realizaron Correlaciones de Spearman entre las variables fisicoquímicas con el fin de evitar redundancia. 2) Se realizó un reescalamiento los puntajes de las estaciones (sample scores) obtenidos desde el primer eje del RDA o del ACC, este paso dimensionó los datos a una escala entre uno y diez utilizando una regresión lineal formulada desde los valores máximo y mínimo de los puntajes en el primer eje. 3) En el programa C2 (software libre) se obtuvieron los puntajes óptimos y de tolerancia para cada organismo a partir de un análisis de promedios ponderados (Weighted Averaging, WA) utilizando las abundancias de las algas y los datos escalados obtenidos en el paso anterior. Estos puntajes fueron asociados a la ecuación del índice descrita en Haase y Nolte (1), indicando $ICE = (\sum O_{pi} * T_{li} * A_{bi}) / ((\sum O_{pi} * T_{li} * A_{bi}))$, donde (O_{pi}) es el valor óptimo, (T_{li}) el valor de tolerancia y (A_{bi}) la abundancia. Por último 4) Para establecer los rangos de las categorías del índice y la variable fisicoquímica indicadora se ejecutó un agrupamiento de Ward y distancia euclidiana. Una ampliación de los aspectos metodológicos puede ser encontrada en la guía de planes de ordenamiento hídrico del año 2014.

RESULTS

Composition and structure of the periphytic algae. 35 morphotypes distributed as follows were recorded, 1 representative of the cyanobacteria, 4 chlorophyllids or green algae, 2 euglenophytas and the division with the largest number of representatives corresponds to the division Bacillariophyta or diatoms with 28 representatives.

The temporal variation of the total density and richness of morphotypes in the six stations and four samplings showed tendencies to higher values in both parameters in stations E1 and E2, likewise the stations E5 and especially E6 recorded the lower densities and richness of organisms in the monitoring network (Figure 2). It is notable that after the second season influenced by the increase in agricultural activities and wastewater discharges, the densities varied between 354 and 20828 Org/cm² and the riches between 5 and 17 taxa. Additionally, important densities were highlighted in samples 3 and 4 (August and October 2014), especially in stations E1, E2 and E3; these differences were significant (KW median test $p < 0.05$).

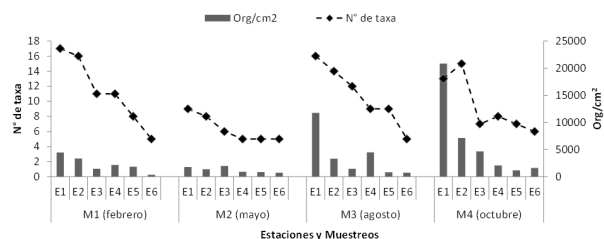


Figure 2. Number distribution and total density of periphytic algae morphotypes per unit area (Org/cm²) during the four campaigns carried out during 2014.

The morphotype with the highest representation among the stations corresponds to the diatoms of the Naviculaceae family, other morphotypes of important frequency were *Cocconeis placentula*, *Encyonema cf. silecianium*, *Fragilaria cf. gouldardi*, *Gomphonema cf. parvulum*, *Melosira sp.*, *Pseudoanabaena sp.*, *Rhoicosphenia sp.*

Determination of the environmental gradient.

The analysis of correspondence without trend (DCCA) indicated a unimodal analysis (ACC) to establish correlation (3.51 first axis length of the gradient standard deviation). The analysis of canonical correspondences was significant ($p = 0.026$, significance test of all canonical axes = 2.85). Additionally, it was confirmed the inflation values of the variance with the variables do not indicate collinearity (values < 20). The variables included in the model were: water temperature, dissolved oxygen, total dissolved

RESULTADOS

Composición y estructura de las algas perifíticas. Fueron registrados 35 morfotipos distribuidos de la siguiente manera, 1 representante de las cianobacterias, 4 clorofíceas o algas verdes, 2 euglenophytas y la división con mayor número de representantes corresponde a la división Bacillariophyta o diatomeas con 28 representantes.

La variación temporal de la densidad total y riqueza de morfotipos en las seis estaciones y cuatro muestreos expuso tendencias a mayores valores en ambos parámetros en las estaciones E1 y E2, así mismo las estaciones E5 y en especial E6 registraron las menores densidades y riquezas de organismos en la red de monitoreo (Figura 2). Es notable que después de la segunda estación influenciada por el aumento de actividades agrícolas y vertimientos de aguas residuales, las densidades variaron entre 354 y 20828 Org/cm² y las riquezas entre 5 y 17 taxa. Adicionalmente, se destacaron importantes densidades en los muestreos 3 y 4 (agosto y octubre de 2014) especialmente en las estaciones E1, E2 y E3; estas diferencias fueron significativas (prueba de medianas KW $p < 0.05$).

El morfotipo con mayor representación entre las estaciones corresponde a las diatomeas de la familia Naviculaceae, otros morfotipos de frecuencia importante fueron *Cocconeis placentula*, *Encyonema cf. silecianium*, *Fragilaria cf. gouldardi*, *Gomphonema cf. parvulum*, *Melosira sp.*, *Pseudoanabaena sp.*, *Rhoicosphenia sp.*

Determinación del gradiente ambiental.

La longitud del gradiente del primer eje (3.51 desviación estándar) obtenido en el análisis de correspondencia sin tendencia indica que el método de ordenación indicado para establecer el gradiente ambiental corresponde a un análisis unimodal (ACC). El análisis de correspondencias canónicas fue significativo ($p = 0.026$, test de significancia de todos los ejes canónicos = 2.85) adicionalmente, los valores de inflación de la varianza asociados a las variables aceptadas por el modelo no indican colinealidad (valores < 20). Las variables incluidas en el modelo fueron: temperatura del agua, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, pH, nitrógeno total, alcalinidad, nitratos, amonio, turbidez, fósforo total, ortofosfatos, dureza total y demanda química de oxígeno.

Entre las variables fisicoquímicas, los sólidos disueltos, el pH, los ortofosfatos y la alcalinidad explicaron un 44% del total de la varianza y entre ellas el pH y la alcalinidad registraron ($p < 0.05$) en el test de MonteCarlo. La temperatura del agua y el pH tuvieron una alta correlación positiva con el primer eje (0.35 y 0.43 respectivamente), en contraste, los sólidos disueltos, la conductividad, la alcalinidad, la dureza total y los ortofosfatos registraron altas correlaciones negativas en este

solids, electrical conductivity, pH, total nitrogen, alkalinity, nitrates, ammonium, turbidity, total phosphorus, orthophosphates, total hardness and chemical oxygen demand.

Among the physicochemical variables, dissolved solids, pH, orthophosphates and alkalinity accounted for 44% of the total variance, including pH and alkalinity ($p < 0.05$) in the MonteCarlo test. The temperature of the water and the pH had a high positive correlation with the first axis (0.35 and 0.43 respectively), in contrast, the dissolved solids, the conductivity, the alkalinity, the total hardness and the orthophosphates registered high negative correlations in this same axis. Due to the significance of the model, the scores of the stations in the ACC (sample scores) represent the basis for calculating the ecological quality index.

The staggering of the scores in the stations and samples obtained in the ACC was done by the equation $y = 7.3229 - 1.8391X$, where X was replaced with the sample score value in each station. The scores were resized to a scale between one and ten according to the suggestions of interpretation proposed by Chalar et al (2), where the highest concentrations of the variables are associated with a lower physicochemical quality and therefore lower values in the samples score

Optimal and tolerance taxa values. After rescaling by means of the linear regression, the optimal and tolerance values were obtained, with each of the morphotypes that are present in the different stations and samplings of the monitoring network considered (Figure 3). The optimum value corresponds to the score of each taxon in the gradient of environmental variation, which goes from affected waters to clean waters, in other words it is the expression of the coupling of abundance to environmental conditions; however, the optimal value must be analyzed in conjunction

with the same axis. Due to the significance of the model the scores of the stations in the ACC (sample scores) represent the base for calculating the ecological quality index.

The rescaling of the scores in the stations and samples obtained in the ACC was done by the equation $y = 7.3229 - 1.8391X$, where X was replaced with the sample score value in each station. The scores were resized to a scale between one and ten according to the suggestions of interpretation proposed by Chalar et al (2), where the highest concentrations of the variables are associated with a lower physicochemical quality and therefore lower values in the samples score.

Valores óptimos y de tolerancia de los taxa.

Después del reescalamiento por medio de la regresión lineal se obtuvieron los valores óptimos y de tolerancia con los que fueron escalonados cada uno de los morfotipos que se encuentran presentes en las diferentes estaciones y muestreos de la red de monitoreo considerada (Figura 3). El valor óptimo corresponde al puntaje de cada taxón en el gradiente de variación ambiental, que va de aguas afectadas a aguas limpias, es otras palabras es la expresión del acople de la abundancia a las condiciones ambientales; sin embargo el valor óptimo debe ser analizado en conjunto con el valor de la tolerancia, el cual describe la amplitud ecológica a lo largo del gradiente ambiental (2), es decir, la persistencia de la abundancia del taxa independiente de la variación de las condiciones ambientales. Veintiocho taxones presentaron puntuaciones óptimas asociadas a condiciones de buena calidad ecológica (> 6.1) y siete presentaron valores correspondientes a estados de calidad crítica (< 4.9) (Figura 3), el rango numérico de estas adjudicaciones es sugerido por (1).

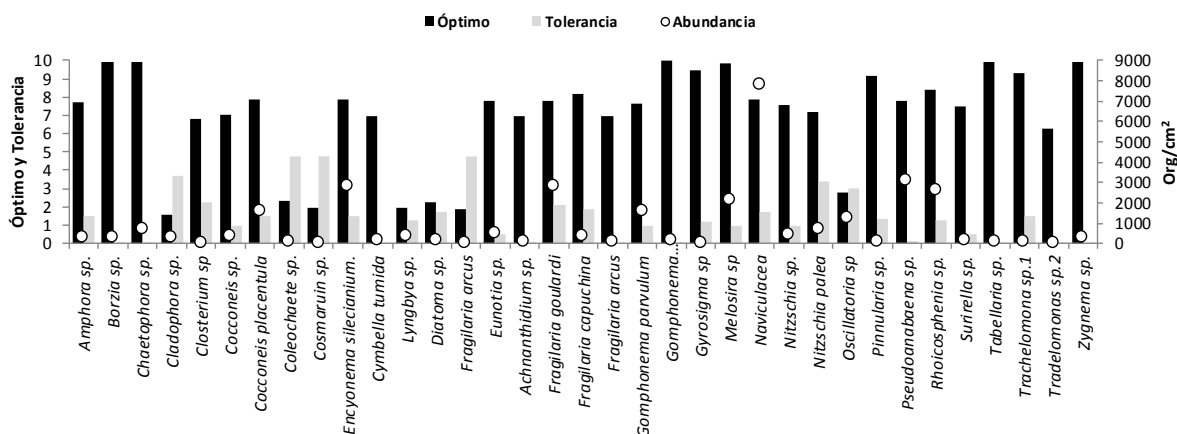


Figure 3. Profile of the optimal and tolerance values after rescaling in association with the canonical correspondence analysis, additionally abundance profile of the periphytic algae morphotypes (Org/cm²) registered in the San Juan River.

with the value of tolerance, which describes the ecological amplitude along the environmental gradient (2), that is, the persistence of the abundance of the taxa independent of the variation of the conditions environmental. Twenty-eight taxa presented optimal scores associated with conditions of good ecological quality (>6.1) and seven presented values corresponding to critical quality states (<4.9) (Figure 3), the numerical range of these awards is suggested by Haase and Nolte (1).

The frequency and abundance of several species with optimum values greater than six (6) suggests adaptation to the environmental conditions of the selected section. Additionally, it is proposed that the taxa that presented high optimum and in turn medium values to low tolerance, indicate sensitivity to the amplitude of the environmental range and for this reason could be used as bioindicadores in the system studied, some of them were *Chaetophora* sp., *Cymbella tumida*, *Gomphonema subclavatum*, *Tabellaria* sp. and *Zygnema* sp. It is recommended to gather results from other systems and to define comparisons between mean values of tolerance, so that important changes can be evidenced in response to environmental variability.

In future samplings these morphotypes will be of considerable attention in terms of their occurrence and abundance in order to identify changes with respect to the behavior of environmental variables.

Index. The values of the ecological quality index of the San Juan River using periphytic algae (ICESJ-Alg) fluctuated between 4.2 and 8.1 (Table 1), these values are highly and significantly correlated with the scores of the samples in the first axis of the ACC (Spearman: $r=-0.75$, $p<0.05$); which means that the index summarizes most of the information between the relationship between periphytic algae and environmental variables. After calculating the equation that defines the index and to establish groups of stations and samplings with similar ecological conditions, a grouping analysis was performed based on the ICESJ-Alg and the indicator variables, which were selected according to the indications suggested by Waas et al (10) and Chalar et al (2). In this case, the total dissolved solids, alkalinity and orthophosphates were chosen as indicators since they represent dynamics that affect the ecological performance of the periphytic algae, these variables contributed 31% of the total explanation of the ACC model.

In the grouping analysis, three sets were determined (Table 1 and Figure 4), the first one gathered stations and periods with higher mean values of dissolved solids and orthophosphates and lower in terms of alkalinity and ICESJ-Alg, the group was station 2 (Quebrada la Chaparrala) in samples 3 and 4 (August and October) and season 5 (Sitio Remolinos) in samples 1 and 4 (February and October), both sites are characterized by turbid

La frecuencia y abundancia de varias especies con óptimos mayores a 6 sugiere adaptación a las condiciones ambientales del tramo seleccionado. Adicionalmente, se propone que los taxa que presentaron altos óptimos y a su vez valores medios a bajos en tolerancia, indican sensibilidad a la amplitud del rango ambiental y por esta razón podrían ser utilizados como bioindicadores en el sistema estudiado, algunos de ellos fueron *Chaetophora* sp., *Cymbella tumida*, *Gomphonema subclavatum*, *Tabellaria* sp. y *Zygnema* sp. Se recomienda reunir resultados de otros sistemas y definir comparaciones entre valores medios de la tolerancia, de forma que se pueda evidenciar cambios importantes en respuesta a la variabilidad ambiental.

Estos morfotipos serán de considerable atención en cuanto a su grado de ocurrencia y abundancia en futuros muestreos con el fin de identificar cambios con respecto al comportamiento de las variables ambientales.

Índice. Los valores del índice de calidad ecológico del río San Juan usando algas perifíticas (ICESJ-Alg) fluctuaron entre 4.2 y 8.1 (Tabla1), estos valores están alta y significativamente correlacionados con las puntuaciones de las muestras en el primer eje del ACC (Spearman: $r=-0.75$, $p<0.05$); lo que significa que el índice resume la mayoría de la información entre la relación entre las algas perifíticas y variables ambientales. Después de calcular la ecuación que define el índice y para establecer grupos de estaciones y muestreos con condiciones ecológicas similares, se realizó un análisis de agrupamiento en base al ICESJ-Alg y las variables indicadoras, las cuales fueron seleccionadas según las indicaciones sugeridas por Waas et al (10) y Chalar et al (2). En este caso se eligieron los sólidos disueltos totales, la alcalinidad y los ortofosfatos como indicadores puesto que representan dinámicas que inciden en el desempeño ecológico de las algas perifíticas, estas variables aportaron un 31% de la explicación total del modelo del ACC.

En el agrupamiento se determinaron tres conjuntos (Tabla 1 y Figura 4), el primero reunió estaciones y períodos con mayores valores medios de sólidos disueltos y ortofosfatos y menores en cuanto a la alcalinidad y ICESJ-Alg, a este grupo se asociaron la estación 2 (Quebrada la Chaparrala) antes de la desembocadura al río San Juan) en los muestreos 3 y 4 (agosto y octubre) y la estación 5 (Sitio Remolinos) aguas arriba de la desembocadura del río Bolívar al río San Juan) en los muestreos 1 y 4 (febrero y octubre), ambos sitios se caracterizan por aguas turbias e intervención antrópica. En contraste el grupo tres tendió a registrar las tendencias contrarias al grupo 1, por ejemplo, tendencia a mayores valores de la alcalinidad y el índice; según la distancia euclidiana este grupo está representado por la separación de la estación 1 (Charco corazón, municipio de Jardín parte alta de la cuenca del río San Juan) y caracterizado por

Table 1. Values of dissolved solids, alkalinity, orthophosphates and index scores (ICESJ-Alg) that detail the categories of the three groups obtained from the cluster analysis (Figure 4) to define the ecological quality based on periphytic algae in a section of the San Juan River.

Group	Site	DS(mg/L)	AL	O	IC
Group 1	E5M1	103.8	0.40	0.50	6.03
	E2M4	101.5	0.40	0.50	6.28
	E5M4	104.5	0.60	0.50	6.52
	E2M3	99.5	0.60	0.20	4.19
	E1M1	100.6	0.60	0.50	8.14
	E2M1	100.5	0.60	0.50	7.72
	E3M1	98.5	0.60	0.50	6.72
	E4M1	101.1	0.40	0.50	7.72
	E6M1	98.9	0.60	0.60	6.81
	E1M2	94.4	1.00	0.20	7.96
	E2M2	97.7	0.40	0.20	7.67
	E3M2	95.2	0.70	0.70	7.80
	E4M2	97.3	0.60	0.30	7.92
Group 2	E5M2	100.5	1.00	0.40	6.17
	E6M2	96.7	1.20	0.40	7.80
	E3M3	99.0	1.00	0.40	7.77
	E4M3	94.9	0.80	0.50	7.74
	E5M3	98.4	0.60	0.30	7.69
	E6M3	96.0	0.80	0.50	6.61
	E1M4	100.2	0.80	0.50	7.89
	E3M4	99.7	0.40	0.50	7.89
Group 3	E4M4	99.2	0.60	0.50	6.83
	E6M4	100.5	0.70	0.50	7.81
	E1M3	98.4	0.8	0.40	8.13
Group	EQ	DS(mg/L)	AL	O	IC
Group 1	Crítica	>102.3	<0.5	>0.5	<5.8
Group 2	Regular	98.4-102.3	0.5-0.7	0.4-0.5	5.8-8.1
Group 3	Buena	<98.4	>0.7	<0.4	>8.1

EQ=Ecological quality; DS(mg/L)=Dissolved solids (mg/L); AL= Alkalinity (mmol/L); O= Orthophosphates (mg/L); IC= ICESJ-Alg

waters and anthropic intervention. In contrast other group tended to register trends contrary to group 1, for example, tendency to higher values of alkalinity and the index; according to the Euclidean distance, this group is represented by the separation of station 1 (Charco Corazón) characterized by clear waters with reduced anthropic intervention during, this case was specifically for sampling 1 (February). The sites in group two showed intermediate values for the four variables and the other stations and samples are adjudicated to it (Table 1). These results correspond to the record in the ACC, therefore, it is confirmed that the stations are grouped following a gradient that goes from waters with higher concentrations of solids and orthophosphates (group 1) to waters with preference to lower concentrations (group 3). Subsequently, the ecological quality ranges were obtained for four variables, the solids, the alkalinity and the orthophosphates (indicator variables) and the ICESJ-Alg. The mean values reported in

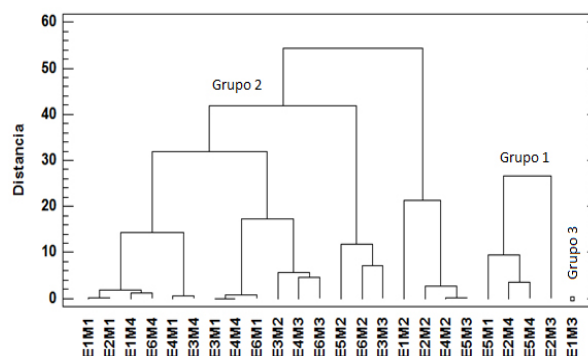


Figure 4. Grouping of the stations according to the scores of the (ICESJ-Alg) and the concentrations of dissolved solids, alkalinity and orthophosphates in each station and sampling in a section of the San Juan River.

aguas claras con reducida intervención antrópica) durante el muestreo 1 (febrero). Los sitios en el grupo dos mostraron valores intermedios para las cuatro variables y a él se encuentran adjudicados las demás estaciones y muestreos (Tabla 1). Estos resultados corresponden con el registro en el ACC, por tanto, se confirma que las estaciones se agrupan siguiendo un gradiente que va de aguas con tendencias a mayores concentraciones de sólidos y ortofosfatos (grupo 1) a aguas con preferencia a menores concentraciones (grupo 3). Posteriormente, los rangos de calidad ecológica se obtuvieron para cuatro variables, los sólidos, la alcalinidad y los ortofosfatos (variables indicadoras) y el ICESJ-Alg. Para la definición de los rangos se utilizaron los valores medios reportados en la tabla 1. Es así como para los sólidos, la alcalinidad, los ortofosfatos y el índice de calidad ecológico los valores de referencia en torno a las categorías se encuentran entre (98.4-102.3 mg/L; 0.5-0.7 mmol/L; 0.4-0.5mg/L y 5.8-8.1) sirvieron como valores (Tabla 1). La calidad ecológica puede ser establecida en base a la medición de las concentraciones de los sólidos, la alcalinidad y los ortofosfatos en conjunto con el cálculo del ICESJ-Alg.

DISCUSIÓN

Entre las variables más importantes que definieron el gradiente ambiental del tramo estudiado en el río San Juan se encontraron los sólidos disueltos, la conductividad, la alcalinidad, los ortofosfatos, la dureza y el pH, por lo cual los componentes químicos más importantes que influyen en este sistema se encuentran asociados a la cantidad de iones en el agua, al sistema carbonato, la capacidad de amortiguar la acidez y la concentración de nutrientes. La mayoría de estas variables se encuentran influenciadas por la concentración de sólidos disueltos totales, la cual constituye la suma

table 1 were used to define the ranges. This is how for solids, alkalinity, orthophosphates and the ecological quality index the reference values around the categories are between (98.4- 102.3 mg/L, 0.5-0.7 mmol/L, 0.4-0.5mg/L and 5.8-8.1) served as values (Table 1). The ecological quality can be established based on the measurement of the concentrations of solids, alkalinity and orthophosphates together with the calculation of the ICESJ-Alg.

DISCUSSION

Among the most important variables that defined the environmental gradient of the section studied in the San Juan River were dissolved solids, conductivity, alkalinity, orthophosphates, hardness and pH, which is why the most important chemical components that influence this system are associated with the amount of ions in the water, the carbonate system, the ability to buffer the acidity and the concentration of nutrients. Most of these variables are influenced by the concentration of total dissolved solids, which constitutes the sum of the cations and anions in the water, representing in turn the dynamics of the natural primary sources, the agricultural and residual flow. This gradient of environmental variation obtained from the ACC expresses water quality delineations that significantly influenced the distribution of the periphytic algae. It is proposed that the activities that condition this behavior are due to the progressive and dynamic fragmentation of natural areas by the increase of agriculture, conditioning a loss in connectivity, however, it would be necessary to generate a structural analysis of the landscape to interpret how the the shape and configuration are associated with the degree of anthropic intervention in this area, for which the integration of remote sensors and hydrogeomorphological information will be necessary in the coupling of future studies.

Additionally, the relationships between the variables and the organisms indicated that the grouping of the space and time considered corresponds to gradient with tendencies at higher concentrations of solids and orthophosphates conjugated with lower values in the alkalinity and in the ecological quality index.

Considering that the study section contemplated six stations and among them the site "Charco Corazón" (located upstream of the basin) during the month of February was classified in the group of good ecological quality (group 3), it was suggested that the system has environmental affectations in most stations which are exacerbated at certain times, especially during the rains when variables such as dissolved solids and the concentration of orthophosphates increases. According to Aguirre et al (5), among the reasons that could explain the detection of signs of deterioration in water quality

de los cationes y aniones en el agua representando a su vez la dinámica de las fuentes primarias naturales, el flujo agrícola y residual. Este gradiente de variación ambiental obtenido a partir del ACC expresa delineamientos en la calidad de agua que influenciaron significativamente la distribución de las algas perifíticas. Se propone que las actividades que condicionan éste comportamiento se deben a la fragmentación progresiva y dinámica de las áreas naturales por el aumento de la agricultura, condicionando una pérdida en la conectividad, sin embargo, sería necesario generar un análisis estructural del paisaje para interpretar cómo la forma y la configuración están asociados al grado de intervención antrópica en esta zona, para ello la integración de sensores remotos e información hidrogeomorfológica será necesaria en el acoplamiento de futuros estudios.

Adicionalmente, las relaciones entre las variables y los organismos indicaron que la agrupación del espacio y tiempo considerados responde a un gradiente de aguas con tendencias a mayores concentraciones de sólidos y ortofosfatos conjugado con menores valores en la alcalinidad y en el índice de calidad ecológica.

Considerando que el tramo de estudio contempló seis estaciones y que para las disposiciones numéricas utilizadas sólo el sitio "Charco corazón" (ubicado aguas arriba de la cuenca) durante el mes de febrero fue clasificado en el grupo de buena calidad ecológica (grupo 3), se sugiere que el sistema presenta afectaciones ambientales en la mayoría de las estaciones que se agudizan en determinados momentos, especialmente durante las lluvias cuando variables como los sólidos disueltos y la concentración de ortofosfatos aumenta (5). Según éstos mismos autores, entre las razones que podrían explicar la detección de las señales de deterioro de la calidad del agua, se encuentran la dominancia de pastos y cultivos de café, lo cual interrumpe la conectividad de bosques y coberturas naturales y aumenta los procesos erosivos, además la presencia de aditivos agroquímicos y falta de control de vertimientos veredales se suman a la escorrentía que transitan hasta las fuentes hídricas afectando la calidad fisicoquímica.

Muestra de éste deterioro y de su posible relación con las actividades antrópicas en la zona, es el comportamiento que evidenciaron variables como los sólidos y los nutrientes, los cuales tendieron a aumentar a medida que se desciende desde la parte alta del río San Juan hasta la desembocadura al río Cauca. Otro factor importante que incide en el análisis de las estaciones y muestreos en el río San Juan es la época de la cosecha del café, la cual tiene lugar en febrero y octubre de cada año y que

are the dominance of pastures and coffee crops, which interrupts the connectivity of forests and natural cover and increases the erosive processes, in addition the presence of agrochemical additives and lack of control of rural dumping are added to the run-off that transits until the hydric sources affecting the physicochemical quality.

Proof of this deterioration and his possible relationship with anthropic activities in the area is the behavior evidenced by variables such as solids and nutrients, which tended to increase as soon as it descends from the upper San Juan River to the mouth to the Cauca River. Another important point that affects the analysis of the seasons and samplings in the San Juan River is the coffee harvest season, which takes place in February and October of each year and during this study coincided with a decrease in pH and from alkalinity to slightly acidic values in conjunction with an increase in the nitrate and ammonia nitrogen content due to the entry of crop residues. Additionally, the electrical conductivity, the chemical oxygen demand and the nutrient concentrations in the San Juan River showed tendencies to increase in the Remolinos and Peñalisa stations (Stations 5 and 6), which evidences the entrance of dissolved substances potentially associated with dumping of wastewater from the settlers located in the basin and a decrease in water quality in these stations, an observation also reported by Aguirre et al (5). These affirmations should be weighted under a robust quantitative diagnosis that complements the results presented in this study, which for now evidences by means of a method of relation between biological and physicochemical information, the significant importance of the variables mentioned above under the scheme of an ecological model.

For the ecological quality index applied to the stretch of the San Juan River, diatoms were abundant components, these organisms are frequent components of periphyton and their level of organization can be unicellular, colonial or filamentous, they are regularly used in the study of the quality of the water, since their cells are included in a cell wall surrounded by silicon, which gives them more weight and, consequently, adaptation to colonize substrates immersed in currents exposed to speed. Diatoms differ from other groups of algae because they present a basic and continuous membrane, constituted by pectin, on which silicic acid is deposited, forming a resistant layer called frustule according to Montoya et al (7).

The optimal and tolerance values closest to good quality conditions indicated as bioindicators of the environmental gradient analyzed to *Chaetophora* sp., *Cymbella tumida*, *Gomphonema subclavatum*, *Tabellaria* sp. and *Zygnema* sp., these organisms correspond to unicellular and filamentous forms and their ecology suggests a wide distribution

durante este estudio coincidió con una disminución del pH y de la alcalinidad hasta valores levemente ácidos en conjunto con un aumento en el contenido de nitratos y nitrógeno amoniacal debido al ingreso de los residuos de la cosecha. Adicionalmente, la conductividad eléctrica, la demanda química de oxígeno y las concentraciones de nutrientes en el río San Juan mostraron tendencias a aumentar en las estaciones Remolinos y Peñalisa (Estaciones 5 y 6), lo que evidencia el ingreso de sustancias disueltas potencialmente asociadas al vertimiento de aguas residuales de los pobladores ubicados en la cuenca y una disminución de la calidad del agua en estas estaciones (5). Éstas aseveraciones deberían ser ponderadas bajo un diagnóstico cuantitativo robusto que complementa los resultados expuestos en éste estudio, el cual por ahora evidencia por medio de un método de relación entre información biológica y fisicoquímica, la importancia significativa de las variables mencionadas anteriormente bajo el esquema de un modelo ecológico.

Para el índice de calidad ecológico aplicado al tramo del río San Juan, las diatomeas fueron componentes abundantes, éstos organismos son componentes frecuentes del perifiton y su nivel de organización puede ser unicelular, colonial o filamentoso, son utilizadas regularmente en el estudio de la calidad del agua, ya que sus células están incluidas en una pared celular rodeada de silicio, lo cual les confiere más peso y en consecuencia, adaptación para colonizar sustratos firmes inmersos en las corrientes expuestas a la velocidad. Las diatomeas difieren de otros grupos de algas porque presentan una membrana básica y continua, constituida de pectina, sobre la cual se deposita ácido silícico, formando una capa resistente denominada frústula (7).

Los valores óptimos y de tolerancia más cercanos a condiciones de buena calidad señalaron como bioindicadores del gradiente ambiental analizado a *Chaetophora* sp., *Cymbella tumida*, *Gomphonema subclavatum*, *Tabellaria* sp. y *Zygnema* sp., estos organismos corresponden a formas unicelulares y filamentosas y su ecología sugiere amplia distribución supeditada a aguas con bajas concentraciones de nutrientes, turbidez y altas concentraciones de oxígeno (11,12), estos organismos se destacaron entre el primer sector de estudio del tramo del río San Juan (Charco Corazón y la sede de la UdeA), en el que la calidad ecológica se adjudicó como buena; en contraste, en la última sección (Remolinos y Peñalisa), en la que se determinó una menor calidad las abundancias de estos taxa tienden a ser menores. Esto evidencia que en el último tramo del río el gradiente ambiental no es favorable para especies de baja tolerancia presentes en estas estaciones, efecto

subject to waters with low concentrations of nutrients, turbidity and high concentrations of oxygen, aspects reported by Poulickova et al (11) and Montoya and Aguirre (12); these organisms stood out among the first sector of study of the section of the San Juan River (Charco Corazón and the UdeA headquarters), in which the ecological quality was adjudged as good. In contrast, in the last section (Remolinos and Peñalisa), in which a lower quality was determined, the abundances of these taxa tend to be lower. This shows that in the last stretch of the river the environmental gradient is not favorable for low tolerance species present in these seasons, an unfavorable effect that was quantified by the ACC scores in combination with the abundances of the algae.

According to Rossaro et al (13) unexpected variations in the composition and structure of the communities of the organisms can be interpreted as obvious signs of some type of alteration. It is for this reason that significant changes in the abundances in these organisms, as well as a possible manifestation of dominance of those that obtained greater tolerance, will enable a reference system that would allow comparing future scenarios in the study section. In other instances, the application of the same design and type of monitoring will help to verify if the occurrence and ranges of optimum and tolerances of these taxa in other biogeographical regions of Colombia also indicate them as biondicadores, which would help to identify patterns of ecological performance and local adaptability, a topic that in Colombia is of an incipient nature and is expected to be relevant through the implementation of the current guidelines of the Water Management Plan Guide, which includes the execution of the ICE for two hydrobiological groups, the periphytic algae and the macroinvertebrates.

In this regard, Forero et al (3) mentions that some researchers in the country, such as Gutiérrez et al (14) and others from Central and South American countries, have worked on the development of metrics that consider more rigorous criteria to evaluate quality of water as the presence of heavy metals and concentration of agrochemicals; such is the case of Moya et al (15) in Bolivia, Acosta et al (16) in Ecuador and Peru and Charlar et al (2) in Uruguay.

According to Pineda et al (17), Canonical Correspondence Analysis (CCA) and weighted averages (AW) have been proposed as effective and objective methods for the development of biological indices that evaluate environmental quality. The estimation of the ecological quality index in the San Juan River combined the potential of the direct gradient analysis (ACC) together with a weighted average model (WA). In the case of Colombia, no publications were found that combine both tools to establish optimal and tolerance scores with periphytic algae. The only studies published in

desfavorable que fue cuantificado por los puntajes del ACC en combinación con las abundancias de las algas.

Variaciones inesperadas en la composición y estructura de las comunidades de los organismos pueden interpretarse como signos evidentes de algún tipo de alteración (13). Es por esta razón que cambios significativos en las abundancias en estos organismos, así como una posible manifestación de dominancia de aquellos que obtuvieron mayor tolerancia habilitarán un sistema de referencia que permitiría comparar escenarios futuros en el tramo de estudio. En otras instancias, la aplicación del mismo diseño y tipo de seguimiento ayudará a verificar si la ocurrencia y rangos de óptimos y de tolerancias de estos taxa en otras regiones biogeográficas de Colombia los señala también como biondicadores, lo cual ayudaría a identificar patrones de desempeño ecológico y adaptabilidad local, temática que en Colombia es de carácter incipiente y se espera tome relevancia mediante la puesta en marcha de los delineamientos actuales de la Guía de Planes de Ordenamiento Hídrico, la cual incluye la ejecución del ICE para dos grupos hidrobiológicos, las algas perifíticas y los macroinvertebrados.

Al respecto, Forero et al (3) menciona que algunos investigadores en el país como Gutiérrez et al (14) y otros procedentes de países de Centro y Sur América, han trabajado en la elaboración de métricas que consideren criterios más rigurosos para evaluar la calidad del agua como la presencia de metales pesados y concentración de agroquímicos; tal es el caso de Moya et al (15) en Bolivia, Acosta et al (16) en Ecuador y Perú y Charlar et al (2) en Uruguay.

El Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC) y el de promedios ponderados (AW) han sido propuestos como métodos efectivos y objetivos para el desarrollo de índices biológicos que evalúan la calidad ambiental (17). La estimación del índice de calidad ecológica en el río San Juan combinó el potencial del análisis del gradiente directo (ACC) junto con un modelo de promedios ponderados (WA). En el caso de Colombia, no se hallaron publicaciones que combinen ambas herramientas para establecer puntajes óptimos y de tolerancia con algas perifíticas. Los únicos estudios publicados en este país acerca del establecimiento de valores de bioindicación se encuentran asociados a un análisis de factores de las abundancias y tolerancias mínimas de géneros de macroinvertebrados (18) y la aplicación del índice de calidad ecológica en los macroinvertebrados de la cuenca del río Negro (3).

Se concluye que el ICE fue una herramienta que posibilitó diagnosticar ambientalmente un tramo

this country on the establishment of bioindication values are associated with an analysis of factors of the abundance and minimum tolerances of genus of macroinvertebrates, elaborated by Riss et al (18) and the application of the ecological quality index in the macroinvertebrates of the Río Negro basin, executed by Forero et al (3).

It is concluded that the ICE was a tool that made it possible to environmentally diagnose a section of the San Juan River by means of categories that refer to an ecological state and that were constructed from correlations between physicochemical variables with the abundance of the periphytic algae, a condition that they do not meet the conventional indexes. The index provided an objective and rigorous response to evaluate numerically the position of each of the sampling stations in a gradient associated with the concentration of solids, nutrients and alkalinity, variables that affect the distribution of optimal values and tolerance of the periphytic algae to the physicochemical conditions of a stretch of the San Juan River, which suggest progressive deterioration of the system from the headwaters to the mouth of the Cauca River. In accordance with the ICE, the elaboration of any aquatic ecological index requires the physicochemical data of an adequate design in the monitoring network, which contemplates the influence of clean waters until contaminated; quantify the taxonomic resolution quantitatively and determine the abundance of each taxon.

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the project Physicochemical and hydrobiological quality of water in the San Juan River (Andes Antioquia) thanks to the support of the Committee for the Development of Research of the University of Antioquia (CODI) regionalization call 2013, Southwest section UdeA, Faculties of Engineering, Public Health and Education and the GeoLimna and DIDES UdeA groups. The authors thank Professor Diana Agudelo for her support in the statistical and ecological interpretation of the index and the UdeA research vice-rectory for their financial support in the socialization of the results.

del río San Juan por medio de categorías que hacen referencia a un estado ecológico y que fueron construidas a partir de correlaciones entre variables fisicoquímicas con la abundancia de las algas perifíticas, condición que no cumplen los índices convencionales. El índice brindó una respuesta objetiva y rigurosa para evaluar en forma numérica la posición de cada una de las estaciones de muestreo en un gradiente asociado a la concentración de sólidos, nutrientes y alcalinidad, variables que afectan la distribución de los valores óptimos y tolerancia de las algas perifíticas a las condiciones fisicoquímicas de un tramo del río San Juan, las cuales sugieren deterioro progresivo del sistema desde la cabecera hasta la desembocadura con el río Cauca. En concordancia con el ICE la elaboración de cualquier índice ecológico acuático requiere los datos fisicoquímicos de un adecuado diseño en la red de monitoreo, la cual contemple la influencia de aguas limpias hasta contaminadas; precisar cuantitativamente la resolución taxonómica y determinar la abundancia de cada taxón.

Agradecimientos

El estudio se realizó en el marco del proyecto Calidad fisicoquímica e hidrobiológica del agua en el río San Juan (Andes Antioquia) gracias al apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación de la convocatoria de regionalización de la Universidad de Antioquia (CODI) 2013. Sección suroeste de UdeA, Facultades de Ingeniería, Salud Pública y Educación y los grupos GeoLimna y DIDES UdeA. Los autores agradecen a la profesora Diana Agudelo por su apoyo en la interpretación estadística y ecológica del índice y al vicerrectorado de investigación de UdeA por su apoyo financiero en la socialización de los resultados.

REFERENCES

1. Haase R, Nolte U. The invertebrate species index (ISI) for streams in southeast Queensland, Australia. *Ecol Indic.* 2008; 8(5):599-613.
2. Chalar G, Arocena R, Pacheco JP & Fabián D. Trophic assessment of streams in Uruguay: A Trophic State Index for Benthic Invertebrates (TSIBI). *Ecol Indic.* 2011; 11:362-369.
3. Forero LC, Longo M, Ramírez JJ & Chalar G. Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del Río Negro (ICE RN-MAE), Colombia. *Biol. Trop.* 2014; 62(2):233-247.
4. Figueroa R. Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad de agua de Ríos del sur de Chile. *Rev Chil Hist Nat.* 2003; 76(2):275-285.

5. Aguirre N, Vélez F, Grajales H, Hernández E, Caicedo O, Mesa JA, Cortes FA. Calidad fisicoquímica e hidrobiológica del agua en el Río San Juan, Andes, Antioquia. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia; 2015.
6. Hernández E, Aguirre N, Palacio J, Ramírez JJ, Duque S, Guisande C, Aranguren N, Mogollón M. Rasgos morfológicos del fitoplancton en seis sistemas leníticos de las regiones amazónica, andina y caribe de Colombia. *Actual Biol.* 2012; 34(96):67-83.
7. Montoya Y, Vouilloud A, Sala S, Aguirre N & Plata Y. Lista de las diatomeas de ambientes continentales de Colombia. *Biota Colombiana.* 2013; 14(2):13-78.
8. Vrugt JA, Ter Braak CJF, Clark MP, Hyman JM & Robinson BA. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resour Res.* 2008; 44(12) W00B09, doi: 10.1029/2007wr006720.
9. Manjarres A, Guisande C. ModestR: Una herramienta informática para el estudio de los ecosistemas acuáticos de Colombia. *Actual Biol.* 2012; 34:225–239.
10. Waas T, Hugé J, Block T, Wright T, Benitez-Capistros F & Verbruggen A. Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development. *Sustainability.* 2014; 6:5512-5534.
11. Poulickova A, Hasler P, Kova M & Spears B. The ecology of freshwater epipellic algae: an update. *Phycologia.* 2008; 47(5):437–450.
12. Montoya Y, Aguirre N. Asociación de algas perifíticas en raíces de macrófitas en una ciénaga tropical colombiana. *Hidrobiológica.* 2009; 18(3):189-198.
13. Rossaro B, Marziali L, Cardoso AC, Solimini A, Free G, Giacchini R. A biotic index using benthic macroinvertebrates for Italian lakes. *Ecol Indic.* 2007; 7:412–429.
14. Gutiérrez JD, Riss W, Ospina R. Lógica difusa como herramienta para la bioindicación de la calidad del agua con macroinvertebrados acuáticos en la Sabana de Bogotá-Colombia. *Caldasia.* 2004; 26(1):161-172.
15. Moya N, Tomanova S, Oberdorff T. Initial development of a multi-metric index based on aquatic macroinvertebrates to assess streams condition in the Upper Isiboro-Sécure Basin, Bolivian Amazon. *Hydrobiologia.* 2007; 589:107-116.
16. Acosta R, Ríos B, Rieradevall M, Prat N. Propuesta de un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de Ríos andinos (CERA) y su aplicación a dos cuencas en Ecuador y Perú. *Limnetica.* 2009; 28:35-64.
17. Pineda C, Buitrago C, Hernández JS, Salazar S, Hernández E, Brijaldo J, et al. Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico. Colombia: MinAmbiente; 2014. ISBN: 9789588491929.
18. Riss W, Ospina R, Gutiérrez JD. Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia.* 2002; 24:135-156.