



Análisis de la variación fisicoquímica del agua en fuentes hídricas con diferente temporalidad de post-aprovechamiento minero a cielo abierto en Jigualito, Condoto, Chocó, Colombia

Analysis of the physicochemical variation in water sources with different temporality of post-exploitation surface mining in Jigualito, Condoto, Chocó, Colombia

Lady Vargas Porras* 

Resumen

Se realizó un análisis de la variación de las características fisicoquímicas del agua en fuentes hídricas afectadas por minería a cielo abierto en diferente temporalidad de abandono en Jigualito, Condoto, Chocó, para lo cual se seleccionaron cuatro escenarios de muestreo, el primero de referencia sin historia minera y los tres restantes con minería actual, 10 y 30 años de cese de la actividad. En cada uno se determinaron variables hidráulicas y se realizaron mediciones in situ de 10 variables fisicoquímicas en el agua. Los muestreos se realizaron entre mayo y octubre del año 2015. Se determinó que la concentración de material suspendido, junto con la temperatura y los nutrientes, son las características fisicoquímicas que determinan la dinámica espaciotemporal de los escenarios hídricos disturbados por minería y explican el 83,5% de la variabilidad de los datos obtenidos. Los análisis estadísticos muestran que a mayor temporalidad del cese de la actividad, hay una reducción en los niveles de contaminación del recurso, debido a que disminuyen las concentraciones de estas variables, indicando que el tiempo beneficia el restablecimiento de las condiciones fisicoquímicas de los cuerpos de agua afectados, sin embargo, existen condiciones ambientales de difícil recuperación, debido a la modificación de las características hidráulicas, la reconformación del cauce, el cambio en la estructura de la vegetación de ribera y la conectividad que se pierde durante el proceso minero, lo que hace que la dinámica de nutrientes en el sistema se vea modificada aun en escenarios de 30 años de abandono minero.

Palabras clave: *Afectación minera, Calidad de agua, Minería a cielo abierto, Restauración fluvial.*

* Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Quibdó, Chocó, Colombia.

Autor correspondencia:
lady8181@gmail.com

Recepción: Octubre 2, 2018
Aprobación: Diciembre 2, 2018
Editor Asociado: HJ Ayala

Abstract

We made an analysis of the variation of the physicochemical characteristics of the water in water sources affected by open pit mining in different time of abandonment in Jigualito, Condoto, Chocó, for which four sampling scenarios were selected, the first one of reference without mining history and the remaining three with current mining, 10 and 30 years of cessation of activity. In each one, hydraulic variables were determined and in situ measurements of 10 physicochemical variables were performed in the water. Sampling was done between May and October 2015. It was determined that the concentration of suspended material, temperature and nutrients are the physicochemical characteristics that determine the spatiotemporal dynamics of the water scenarios disturbed by mining and explain the 83.5 % of the variability of the data obtained. Statistical analyzes show that, due to the greater temporality of the cessation of activity, there is a reduction in the levels of contamination of the resource, since the concentrations of these variables decrease, indicating that the time benefits the reestablishment of the physicochemical conditions of the water bodies, there are environmental conditions that are difficult to recover due to changes in hydraulic characteristics, re-forming of the channel, changes in the structure of riparian vegetation and connectivity lost during the mining process that the nutrient dynamics in the system will be modified even in scenarios of 30 years of mining abandonment.

Keywords: Mining, Open pit mining, River restoration, Water quality.

Introducción

La actividad minera en Condoto, Chocó, se realiza a cielo abierto empleando maquinaria para remover el material del suelo, desviar cau-

ces hídricos y utilizarlos como fuente de abastecimiento de agua y sitio de disposición final de los residuos del proceso, los cuales incluyen grandes cantidades de sedimentos, contaminantes químicos, metales, grasas y aceites, que son vertidos directamente, ocasionando la alteración de las características fisicoquímicas del agua y afectando a su vez el funcionamiento ecológico de estas (Edding *et al.* 1995, Martin *et al.* 2004, IIAP 2012,) que han utilizado grupos biológicos para evaluar el nivel de afectación y la respuesta de los ecosistemas hídricos frente a los disturbios antrópicos. Teniendo en cuenta esta problemática, la presente investigación busca evaluar las características fisicoquímicas del agua en sistemas hídricos disturbados por minería con diferente exposición histórica al impacto como herramienta para diagnosticar las afectaciones producidas por la actividad.

Teniendo en cuenta que las fuentes hídricas en el departamento del Chocó tienen una importancia que va más allá de la disponibilidad de agua para consumo y el desarrollo de actividades productivas o domésticas, constituyen el hábitat para gran diversidad de especies, áreas de conexión biológica entre diferentes ambientes y, para muchas poblaciones de la zona, el único medio de transporte, espacio de disfrute colectivo, que además tiene valores religiosos y culturales asociados, que se han perdido como resultado de su transformación en ríos de lodo por acción de la minería. Esta actividad realizada a cielo abierto haciendo uso de retroexcavadoras que remueven el material del suelo y modifican el paisaje, genera, durante su proceso, grandes cantidades de sedimentos, contaminantes químicos, microbiológicos, metales, grasas y aceites, que son vertidos directamente a las fuentes hídricas, ocasionando la alteración de las características fisicoquímicas del agua, las cuales a su vez determinan y modelan la estructura de grupos biológicos.

De acuerdo con ello, los impactos ambientales más significativos generados por la actividad



minera son ocasionados en las fuentes hídricas como resultado de la cantidad y tipología de sus vertimientos, de ahí que estos ecosistemas en el departamento, y específicamente en el municipio de Condoto, hayan sufrido un deterioro que evidencia la desviación y sedimentación de sus cauces, lo que ha afectado la biota acuática y su disponibilidad para ofertar bienes y servicios a las comunidades aledañas. Esta situación se agrava, no solo con las dificultades de control por parte de las autoridades ambientales debido a la cultura de ilegalidad de esta actividad, sino también con la importancia de la minería como motor de desarrollo económico a nivel nacional y regional, lo que genera además su permanencia y la de sus impactos. A lo anterior, se suma la poca información básica sobre recuperación de los ecosistemas hídricos, que son de gran importancia para el desarrollo de las comunidades de toda la región, vacío que está relacionado en parte con la falta de estudios e investigaciones específicas sobre el análisis de los efectos del disturbio minero en sus dinámicas fisicoquímicas y ecológica, su comportamiento en el tiempo, espacio y su resiliencia. Pese a que ha existido un avance en el estudio de los requerimientos de recursos naturales para el proceso de extracción, de estrategias de manejo ambiental durante el proceso y de iniciativas viables de recuperación de la cobertura vegetal, existen vacíos de información en torno al análisis de los impactos sobre la dinámica fisicoquímica, sus efectos en el tiempo y las medidas de manejo que producen el mejoramiento de las condiciones de estos sistemas una vez son impactados.

Todo lo anterior expone la necesidad de realizar una evaluación y análisis integral de los efectos generados en dicho aspecto, como una herramienta para el conocimiento del alcance de la afectación causada y el establecimiento de medidas durante y después del proceso que permitan mitigar el daño y restablecer parte de las funciones ecosistémicas afectadas. De este modo, la importancia de estos sistemas, las presiones sobre ellos y el vacío de

información sobre el estudio de las afectaciones mineras y su restauración, muestran una clara urgencia de evaluar los efectos de la alteración causada por la minería sobre las condiciones fisicoquímicas del agua, variables que, aunque evidentemente son afectadas durante el proceso minero, se desconoce su comportamiento temporal después de la afectación. Esta información es requerida como base para entender el disturbio y tomar decisiones acertadas en cuanto a su recuperación.

Metodología

Área de estudio. El trabajo de campo se realizó en el Distrito Minero del San Juan, puntualmente en el corregimiento de Jigualito (74 msnm), perteneciente al municipio de Condoto, Chocó y en la cabecera municipal de Cértegui, Chocó, Colombia. Ambos se ubican en una zona que se caracteriza biofísicamente por representar un bosque pluvial tropical, donde la precipitación anual oscila entre 4.000 y 10.000 mm, la temperatura promedio es de 26°C y la humedad relativa supera el 80% (Poveda-M *et al.* 2004). El territorio se encuentra en la zona de calmas ecuatoriales, y por su ubicación, está sometido a un régimen de lluvias muy intenso, y se le cataloga como “selva umbrofila-siempre verde”, con predominancia de baja altitud y bosque aluvial (IGAC y MAVDT 2000) y con relativa intervención “mosaico antrópico”. El paisaje de la zona se ubica en el nivel de llanura aluvial meándrica (aluvial y fluvio volcánica). Las principales actividades económicas de esta zona del departamento son la minería, la pesca, la agricultura a baja escala de maíz, arroz, yuca, frutales y el comercio. El municipio tiene una extensión de 890 km², que equivalen al 5% de la territorialidad del departamento del Chocó.

Para lograr los objetivos planteados se seleccionaron cuatro fuentes hídricas que permitieron la identificación de diferentes escenarios o estaciones de muestreo con distintos tiempos de

cese del disturbio. La primera correspondió a una fuente hídrica sin intervención minera, la segunda presentó entre 5 y 10 años de haber cesado la actividad, la tercera contó con más de 30 años de abandono de la actividad y la última presentó recepción actual de vertimientos mineros.

Descripción de escenarios o estaciones de muestreo

Estación 0. Quebrada Pichirí. Fuente hídrica sin intervención minera, localizada entre las coordenadas N 5°1'8"-W 76°41'17" y N 5°01'7,1"-W 76°41'16,8", constituye la única fuente de la zona que no ha sido utilizada para la extracción de metales, presenta aguas corrientes y limpias con abundante vegetación ribereña donde sobresalen *Inga* sp., *Miconia* sp., *Geonoma* sp., *Dialyanthera* sp., *Socratea exorrhiza*, *Gusmania* sp., *Matisia castano* (Figura 1). La cuenca tiene un área de 111,95 ha (5,01 km²), una longitud de 1,97 km, ancho promedio de 0,057 km y se encuentra entre 66-89 msnm.

Estación 1. Quebrada Sabaleta. Fuente hídrica que presenta entre 5 y 10 años de haber cesado la actividad minera, ubicada entre N 5° 1'50,2"-W 76° 41'20,5" y N 5° 1'49,6"-W 76° 41'14,7".

Cuenta con cauce desviado e interrumpido en varios tramos que han sido convertidos en lagunas conectadas o desconectadas del cauce principal. Los distintos sectores presentan diferentes temporalidades de cese de intervención y variabilidad de condiciones físicas. La vegetación interrumpida en las riberas presenta procesos de sucesión temprana con predominio de *Spathiphyllum friedrichsthalii*, *Gramineas* y *Ciperaceas* (Figura 2). La cuenca cuenta con un área de 457,11 ha (10,48 km²), una longitud de 2,73 km, un ancho promedio de 1,26 km y 48-63 msnm.

Estación 2. Quebrada Marcos Díaz. Fuente hídrica con más de 30 años de cese de la actividad minera, localizada en N 5° 2'32,1"-W 76° 41'33,6" y N 5°2'35,3"-W 76° 41'30,9". Presenta cauce modificado e integrado por sectores naturales conectados con un canal artificial. Los sectores naturales presentan características lóxicas y el canal constituye un tramo con flujos muy lentos e inundables. Las riberas presentan vegetación interrumpida en estado de sucesión avanzada con predominio de *Spathiphyllum friedrichsthalii*, *Gleichenia bifida* y diferentes especies de *Gramineas* y *Ciperaceas* (Figura 3). La cuenca cuenta con un área de 52,04 ha (3,15 km²), una longitud de 1,24 km, un ancho promedio



Figura 1. Estación 0. Quebrada Pichirí, sin intervención minera.



de 0,42 km y 56-59 msnm.

Estación 3. Quebrada Jorobibó. Fuente hídrica con recepción actual de vertimientos de minería mecanizada con retroexcavadora en combinación con minería artesanal en algunos tramos; se localiza entre los N 5°22'56,7"-W 76°36'51,3" y N 5°22'51,8"-W 76°36'53,8". Tiene desviación del cauce y vegetación interrumpida en las riberas con predominio de *Gleichenia bifida*, algunas *Gramíneas* (*Axonopus* sp.), *Ciperáceas* y *Aráceas* como *Anthurium* sp. y *Spathiphyllum friedrichsthalii* (Figura 4). La cuenca tiene un área de 246,27 ha (2,46 km²), una longitud de 2,58 km, un ancho promedio de 0,95 km y 90-99 msnm.

Métodos

Muestras. En cada escenario o estación se establecieron 2 puntos de muestreo ubicados teniendo en cuenta la heterogeneidad de los ambientes (Figura 5). Se realizaron 4 muestreos distribuidos así: 3 durante épocas de altas lluvias (mayo y agosto) y 1 un muestreo en época de bajas lluvias (octubre) (Guzmán *et al.* 2014). Por campaña de muestreo se tomaron dos muestras por estación para los análisis biológicos para un total de 16 por muestreo.

Fase de campo. La caracterización fisicoquímica de las estaciones se realizó mediante la

medición *in situ* de variables fisicoquímicas en los 8 puntos de muestreo establecidos en las 4 estaciones. En cada uno se determinó el ancho y la profundidad media con una cinta métrica, el caudal y la velocidad utilizando un caudalímetro y se midió temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad, sólidos disueltos (TDS) y turbiedad en el agua, mediante el uso de un multiparámetro YSI Profesional Plus Quick 1700/1725. También se determinaron las concentraciones de nutrientes (nitratos, nitritos y fosfatos) y sólidos suspendidos (SS) utilizando un colorímetro portátil HACH DR 900, el cual presenta los siguientes rangos de cuantificación:

- Sólidos suspendidos: 5-1.100 mg/l
- Turbiedad: 0-1.000 FAU
- Fosfato: 0,02-2,5 mg/l
- Nitrato: 0,03-30 mg/l
- Nitrito: 0,005-0,350 mg/l

Análisis de datos. Para el análisis de la información se realizó una exploración de los datos mediante estadística descriptiva, determinando las medidas de tendencia central (media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación) para cada variable fisicoquímica. La dispersión de las variables fue analizada en histogramas usando como factores de análisis las estaciones y muestreos. Para determinar si los datos presentaban diferencias significativas entre factores de análisis



Figura 2. Estación 1. Quebrada Sabaleta con 5 a 10 años de cese minero. a, b, c. Aguas arriba. d, e, f. Aguas abajo.



Figura 3. Estación 2. Quebrada Marcos Díaz con 30 años de cese minero. a, b. Aguas abajo. c, d. Aguas abajo, tramos con régimen lento.



Figura 4. Estación 3. Quebrada Jorobibó con explotación minera actual. a, b, c. Aguas arriba. c, d, e. aguas abajo del vertimiento minero.

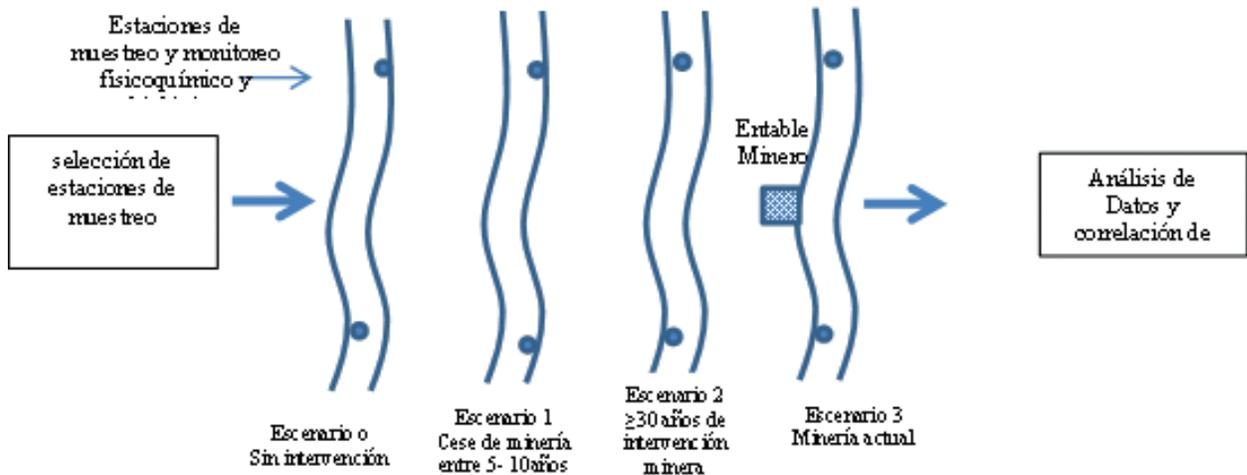


Figura 5. Diagrama del proceso metodológico.

y después de verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. Se realizó un análisis de correspondencia (DCA) para determinar tendencias de agrupación de los muestreos de acuerdo con las variables analizadas en cada escenario.

Resultados

Caracterización fisicoquímica de las estaciones. Los valores promedios de las variables físicas, químicas e hidráulicas, registrados en cada una de las estaciones se presentan en la Tabla 1; en la Figura 6 se pueden observar los esquemas de tendencias centrales de las variables con su respectiva significancia entre factores de análisis, estaciones, muestreos y sitios. Al respecto, el efecto entre muestreos y estaciones no es significativo, por lo cual sólo se observan tendencias diferenciales entre estaciones y afiliados a estos sólo tres variables no presentaron diferencias significativas, es decir valores de $p > 0,05$: el pH, el oxígeno disuelto y la concentración de fósforo total.

En contraste, las características hidráulicas (velocidad y caudal), la temperatura de agua, las especies inorgánicas del nitrógeno (NO_2 , NO_3) y las variables relacionadas con la concentración de ma-

terial disuelto y suspendido en el agua (TDS, SS, conductividad y turbiedad) presentaron diferencias significativas entre las estaciones, sugiriendo que fluctuaron en forma significativa ($p < 0,05$) y que pueden estar asociadas con la relación entre la minería y las condiciones ambientales de los cuerpos de agua estudiados.

Velocidad y caudal. La velocidad presentó variaciones notables entre muestreos y estaciones (coeficiente de variación entre 52 y 126). Los valores más altos correspondieron a las estaciones E1 y E3, con medias de 0,55 m/s y 0,48 m/s respectivamente, evidenciando mayor velocidad y turbulencia del agua en estas estaciones donde el disturbio es más reciente. Los valores mínimos se obtuvieron en el escenario E2 (con 30 años de cese minero) con un valor medio de 0,18 m/s, que coincidió con tramos de cauce que fueron modificados y aplanados con el paso de la draga durante la extracción minera hace 30 años, haciendo que actualmente el flujo de agua sea lento en esa zona (Figura 6A y B). El caudal también presentó fluctuaciones considerables, el mayor flujo de agua se concentró en los escenarios E0 con una media de 0,76 m^3/s y E1 con 0,46 m^3/s , mientras que los escenarios E2 y E3 se caracterizaron por presentar menores caudales, porque en estas últimas estaciones las características morfométricas

Tabla 1. Estadígrafos de tendencia central y de dispersión de las variables hidráulicas y fisicoquímicas por escenario

Escenario/Estación	Estadígrafo	Vel (m/s)	Q (m ³ /s)	T (°C)	pH	OD (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	CON (µs/cm)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)	TUR (FAU)
Pichirí sin minería E0	Media	0,21	0,76	26,1	6,50	5,49	0,01	0,45	0,36	6,35	3,11	1,13	1,25
	Min	0,06	0,17	25,4	6,00	4,79	0,00	0,00	0,08	5,23	2,00	0,00	0,00
	Max	0,49	1,46	27,0	7,50	6,90	0,01	0,80	0,81	7,12	4,55	4,00	3,00
	DE	0,15	0,59	0,75	0,64	0,82	0,00	0,31	0,23	0,78	0,98	1,64	1,28
	CV	69,1	77,8	2,86	9,85	15,0	45,1	68,6	65,5	12,3	31,5	146	103
Sabaleta 5 a 10 años E1	Media	0,63	0,47	29,0	6,13	5,64	0,04	0,00	0,50	13,1	6,62	25,1	28,6
	Min	0,24	0,23	26,6	5,37	4,10	0,02	0,00	0,00	6,04	2,40	7,00	11,0
	Max	1,58	0,94	32,0	7,10	6,75	0,07	0,03	2,50	24,0	11,0	73,0	83,0
	DE	0,41	0,24	1,81	0,59	0,89	0,02	0,01	0,84	5,08	2,70	21,9	24,5
	CV	65,7	52,0	6,25	9,55	15,8	37,7	283	168,9	38,9	40,8	87,2	85,5
Marcos Díaz 30 años E2	Media	0,18	0,21	27,7	6,11	4,22	0,02	0,58	0,49	23,1	11,8	4,63	8,75
	Min	0,00	0,00	26,3	5,40	2,20	0,00	0,00	0,02	5,40	2,70	0,00	1,00
	Max	0,67	0,45	30,3	6,70	7,00	0,05	2,40	1,72	59,0	27,7	13,0	20,0
	DE	0,22	0,17	1,27	0,39	1,54	0,02	0,88	0,65	19,6	8,84	4,57	7,13
	CV	126	84,6	4,58	6,37	36,5	102	153	132,6	84,7	75,0	98,7	81,4
Jorobibó E3	Media	0,48	0,19	27,4	6,51	5,64	0,06	4,64	0,70	10,5	5,88	193	197
	Min	0,12	0,07	24,9	5,80	4,44	0,00	0,00	0,00	4,90	1,80	0,00	0,00
	Max	1,10	0,38	29,9	7,40	6,50	0,37	35,0	2,68	12,8	7,80	1067	1100
	DE	0,36	0,12	1,39	0,57	0,78	0,12	12,3	0,91	3,15	2,32	374	384
	CV	74,4	62,8	5,08	8,78	13,9	197	265	131	30,1	39,6	194	195
Kruskal-Wallis (H3,32)		12,1	10,6	13,6	2,57	6,15	14,1	7,79	1,34	9,96	10,9	14,9	14,4
p*		0,007	0,014	0,003	0,462	0,104	0,002	0,05	0,71	0,01	0,01	0,002	0,002

* Valores p de Kruskal-Wallis con un nivel de confianza del 95% teniendo en cuenta como factores de discriminación los escenarios.



como ancho y área son menores. Ambas variables presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$).

Temperatura. La temperatura mostró fluctuaciones a lo largo de los escenarios, con un coeficiente de variación, que estuvo por debajo de 7,76 para todos los muestreos (Tabla 1). Esta variable osciló entre 25,4 y 32°C evidenciando aguas cálidas en todos los escenarios; los valores más altos se concentraron en la estación E1, que presentó un rango entre 26,6 a 32°C (Figura 6C), mostrando una mayor exposición a la radiación solar por la poca vegetación asociada (Figura 4), que en áreas entre 5 y 10 años de abandono minero aún se encuentra en estados sucesionales tempranos. Esta variación obtenida pudo estar relacionada con las horas de muestreo y el nivel de radiación presentado en cada uno. Los valores más bajos se presentaron en el escenario E0 donde predomina la cobertura vegetal boscosa por ser un área no intervenida; estas diferencias fueron significativas (Figura 6 C).

Sólidos suspendidos y turbidez. Los sólidos suspendidos presentaron marcadas variaciones y diferencias entre las estaciones, de ahí que su coeficiente de variación para todos los muestreos haya estado entre 87,2% y 194% y que su comportamiento presentara diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) (Tabla 1). Esta variable osciló entre < 5 y 1.067 mg/l, concentrando valores por debajo de 28 mg/l en las estaciones E0, E1 y E2 y desde 59 hasta 1.067 mg/l en la estación E3 donde actualmente opera la actividad minera. La estación E0 donde no ha existido minería, presentó los niveles más bajos, en un rango entre < 5 y 4 mg/l, mientras en E1 con 5 a 10 años de abandono minero, los SS variaron entre 7 y 73 mg/l, rango que descendió de < 5 a 10 mg/l en la estación E2 con 30 años de cese de la actividad, evidenciando que esta variable decrece desde los escenarios de explotación reciente hasta aquellos con mayor tiempo de cese de la actividad minera (Figura 6D).

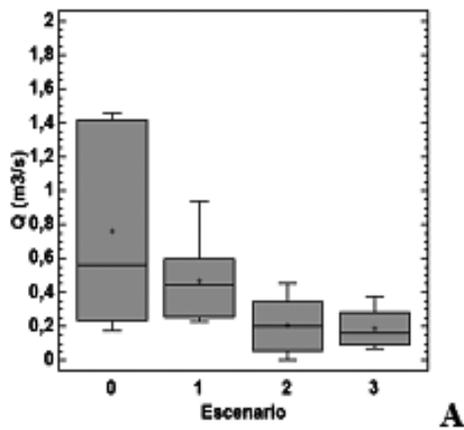
La turbidez que está directamente relacionada

con la presencia de material suspendido (Figura 6 D), tuvo un comportamiento paralelo a los SS, presentando coeficientes de variación desde 81,4% hasta 195% para todos los muestreos (Tabla 1). Al igual que los SS, la turbiedad presentó notables diferencias de una estación a otra. En E0, E1 y E2 que corresponden a zonas donde no se ha desarrollado o ha cesado la intervención minera, se presentaron los valores más bajos que van desde 0 hasta 83 FAU y en la estación E3 con presencia actual de minería durante los muestreos, alcanzó concentraciones máximas de 1100 FAU, superando en un alto porcentaje al resto de los datos obtenidos para esta variable, debido a los grandes vertimientos de material sólido que esta actividad genera durante su operación.

Sólidos disueltos y conductividad. Los sólidos disueltos TDS mostraron notables diferencias entre las estaciones que han tenido influencia de la actividad minera (E1, E2, E3) en contraste con la estación sin minería (E0), estas diferencias fueron significativas (Tabla 1 y Figura 6E). Los valores más altos se presentaron en E2 con un promedio de 11,8 mg/l, seguido de E1 y E3 con medias de 6,62 y 5,88 mg/l respectivamente. Estas estaciones por sus condiciones de intervención se caracterizan por presentar mayor intercambio entre el suelo y los sustratos asociados con el agua, mientras que en E0 donde este intercambio se puede ver reducido por acción de la vegetación, las concentraciones oscilaron entre 2 y 4,5 mg/l con una media de 3,1 mg/l.

La conductividad que tiene una relación directamente proporcional con los TDS presentó un comportamiento similar, mostrando la media más alta para la estación E2 con 23,1 $\mu\text{s/cm}$ y en E0 con 6,3 $\mu\text{s/cm}$ fue la más baja. Las estaciones E1 y E3 presentaron valores medios de 13,1 y 10,5 $\mu\text{s/cm}$ respectivamente y para esta variable se mantuvo la diferencia entre estaciones con minería y sin minería (Figura 6E).

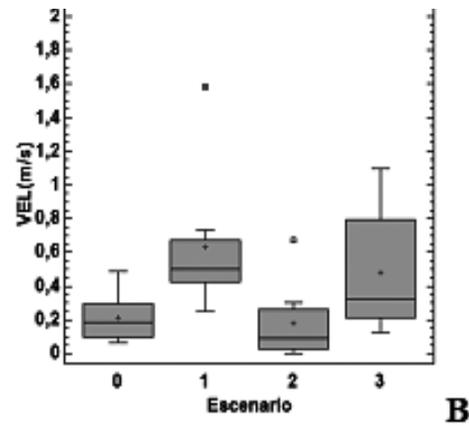
Oxígeno disuelto y pH. Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) mostraron un compor-



Esc: K-W= 10,62 Valor-P = 0,014

Mto: K-W = 1,65 Valor-P = 0,648

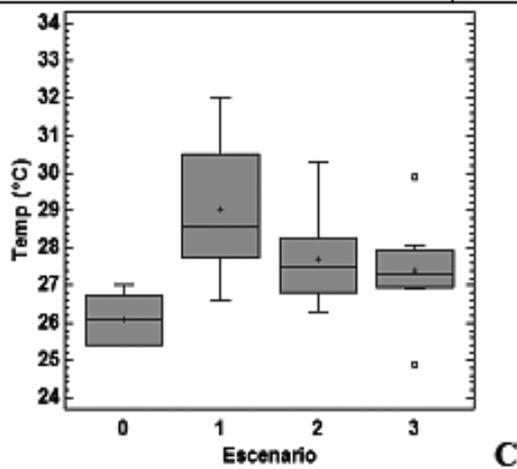
Siti: K-W= 0,63 Valor-P = 0,428



Esc: K-W = 12,07 Valor-P = 0,007

Mto: K-W = 0,73 Valor-P = 0,866

Siti: K-W= = 0,03 Valor-P = 0,879

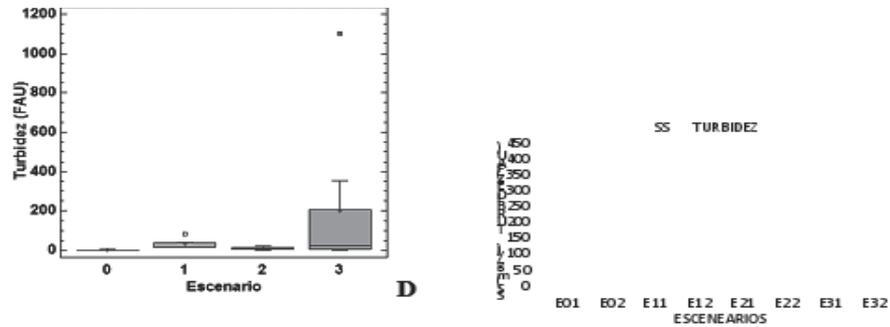


Esc: K-W = 13,61 Valor-P = 0,003

Mto: K-W = 5,47 Valor-P = 0,140

Siti: K-W = 0,99 Valor-P = 0,317

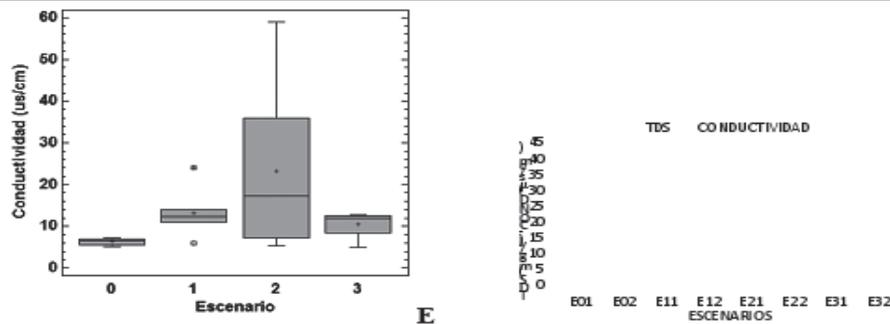
Figura 6 A, B, C.



Esc: K-W = 14,44 Valor-P = 0,002

Mto: K-W = 2,42 Valor-P = 0,490

Siti: K-W = 0,93 Valor-P = 0,335



Esc: K-W = 9,96 Valor-P = 0,018

Mto: K-W = 0,47 Valor-P = 0,924

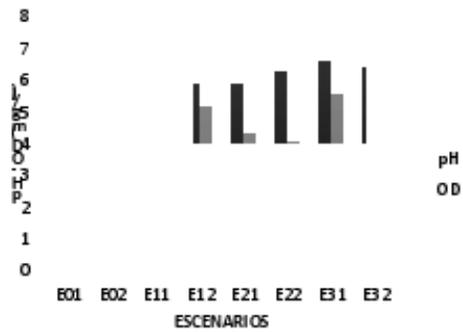
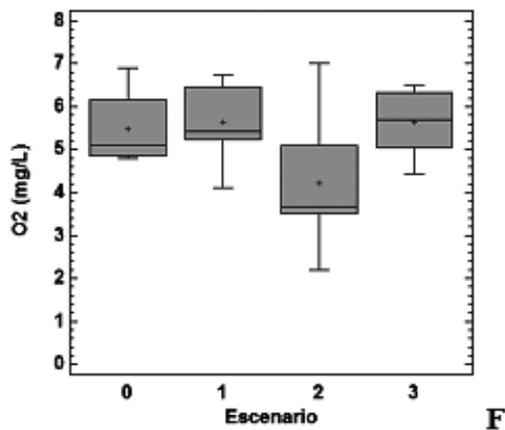
Siti: K-W = 2,22 Valor-P = 0,136

Figura 6 D, E.

tamiento similar entre escenarios (CV<36,5), indicando una predominancia de aguas bien oxigenadas en E0, E1 y E3, donde los promedios de OD oscilaron entre 5,5 y 5,6 mg/l. Sin embargo, el escenario E2 generó tendencias a concentraciones más bajas, que indicaron niveles críticos a moderados de disponibilidad de oxígeno (entre 2,2 y 4,3 mg/l), estos valores se encuentran relacionados con la baja velocidad de flujo del agua en tramos con poca pendiente como resultado de la modificación del cauce con el tránsito de las dragas mineras en esta estación. A pesar de ello, el comportamiento homogéneo entre la mayoría

de los muestreos y estaciones hizo que la variable OD no presentara significancia estadística (Figura 6F). Los valores del pH fueron similares entre escenarios; oscilaron de ligeramente ácidos a neutros en un rango de 5 a 7,5, con valores medios entre 6,1 y 5,6 para todas las estaciones (Figura 6F). Este comportamiento generó un CV <9,8 (Tabla 1).

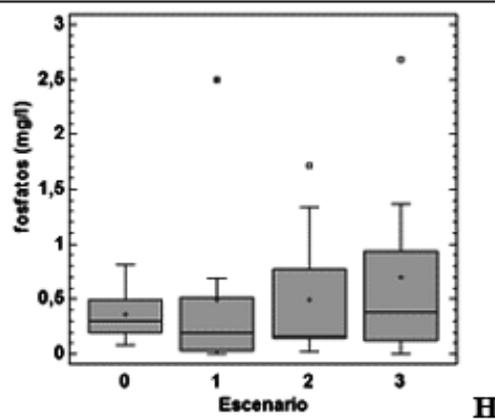
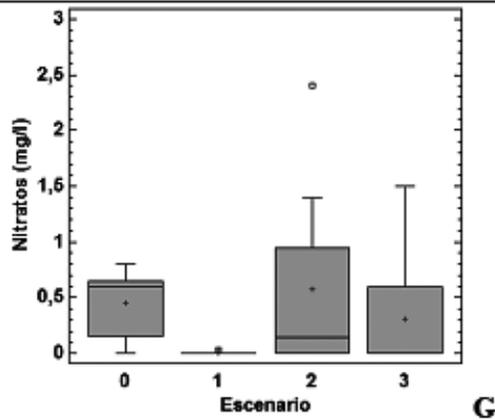
Nutrientes. Los nitritos se encontraron en bajas concentraciones en las estaciones monitoreadas (de 0,005 a 0,07 mg/l). Aunque se presentaron pocas variaciones entre los distintos muestreos y las estaciones E1, E2 y E3 y se obtuvieron



Esc: K-W = 6,15173 Valor-P = 0,051

Mto: K-W = 3,84581 Valor-P = 0,278

Sitio: K-W = 0,172286 Valor-P = 0,678



Esc: K-W = 8,36 Valor-P = 0,038

Mto: K-W = 0,84 Valor-P = 0,838

Sitio: K-W = 0,15 Valor-P = 0,701

Esc: K-W = 1,35 Valor-P = 0,717

Mto: K-W = 3,35 Valor-P = 0,340

Sitio: K-W = 1,46 Valor-P = 0,227

Figura 6 F, G, H.

Figura 6. Esquemas de tendencia central y de dispersión de las variables hidráulicas y fisicoquímicas por escenario; valores p de Kruskal-Wallis con un nivel de confianza del 95% teniendo en cuenta como factores de discriminación los escenarios (ESC), muestreos (MTO) y sitios.



promedios ligeramente cercanos (0,04, 0,02 y 0,06 mg/l respectivamente) (Tabla 1); existe una notable diferencia entre estas estaciones que se caracterizan por la presencia previa o actual de minería y la estación E0 en la que no se ha realizado esta actividad, cuya concentración promedio solo alcanzó 0,006 mg/l.

Los nitratos oscilaron entre <0,03 y 1,6 mg/l para todas las estaciones; los valores más altos se concentraron en la estación E2 (30 años de cese minero). Las concentraciones más bajas se presentaron en E1, donde varió entre <0,03 y 0,03 mg/l, mientras que las estaciones E0 y E3 presentaron un aumento considerable, que arrojó promedios de 0,45 y 0,47 mg/l respectivamente (Tabla 1 y Figura 6G). Esta variable presentó marcadas diferencias entre los muestreos y las estaciones, de ahí que su coeficiente de variación haya sido alto en la mayoría de los casos (entre 68% y 283%). La estación E0 sin intervención minera presentó las concentraciones más constantes entre los muestreos, con un rango de variación entre 0,03 y 0,8, mientras que la estación con recepción actual de vertimiento mineros E3, obtuvo la mayor variabilidad con oscilaciones entre 0,03 y 1,6 mg/l, diferencia que evidencia la influencia de la actividad en las condiciones ambientales de los escenarios y que aportó a la significancia estadística de esta variable para explicar estos fenómenos (Figura 6H).

Los fosfatos presentaron concentraciones similares entre muestreos y estaciones; los promedios entre ellas estuvieron muy cercanos y mostraron homogeneidad en los datos, con un ligero incremento en E3 donde el promedio fue 0,7 mg/l, mientras que en estaciones E0, E1 y E2 los valores medios se mantuvieron en el rango de 0,4 a 0,5 mg/l. A pesar de estos ligeros cambios las diferencias para esta variable no fueron significativas (Figura 6 H).

La caracterización fisicoquímica mostró que la estación E0 presenta condiciones típicas de ecosistemas hídricos naturales con bajo o nulo

nivel de intervención antrópica, comportamiento que fue determinado por bajas concentraciones de material suspendido y disuelto (promedios de 1,2 FAU y 7,1 $\mu\text{s/cm}$), buenas condiciones de oxigenación (>4 mg/l según Decreto 1594 de 1984), temperatura promedio de 26°C, pH ligeramente ácido a neutro y pocas variaciones en la concentración de nutrientes entre puntos y muestreos, evidenciando condiciones de estabilidad en el agua que favorecen el desarrollo de grupos biológicos. En contraste, la estación E1 (5 a 10 años de cese minero) presentó un incremento en las concentraciones de material disuelto y suspendido con relación a E0, lo cual tuvo un efecto directo en la turbiedad y conductividad del agua (hasta 83 FAU y 24 $\mu\text{s/cm}$). Aunque se registraron niveles de oxígeno y pH similares, así como baja concentración de nutrientes, esta estación se caracterizó por presentar temperaturas más altas (entre 26,6-32°C), debido a una mayor exposición a la radiación solar por la falta de cobertura vegetal como resultado del disturbio minero.

Por su parte, la estación E2 (30 años de cese minero) mostró bajas concentraciones de sólidos disueltos y suspendidos, correspondientes a aguas con poca turbidez y conductividad (promedios de 8,8 FAU y 23 $\mu\text{s/cm}$). Presentó una temperatura promedio de 27,7°C, además de una tendencia a la acidez (promedio pH 6,1), relacionadas con concentraciones considerables de nitratos y fosfatos, bajos niveles de oxígeno disuelto (<4 mg/l en el 60% de los muestreos) y poca velocidad de flujo (0,17 m/s en promedio) en zonas de cauce aplanadas por la maquinaria minera. Para el caso de la estación E3 (minería actual), se registraron condiciones de alteración evidenciadas en una alta concentración de sólidos suspendidos (hasta 1.067 mg/l), que se reflejaron en niveles de turbidez hasta de 1.100 FAU. Aunque se presentó una buena oxigenación y los sólidos disueltos mantuvieron concentraciones entre 3 y 7,8 mg/l, consecuentes con niveles de conductividad casi constantes entre 11 y 12 $\mu\text{s/cm}$, los nitratos presentaron su nivel

máximo (35 mg/l) en este escenario, mostrando una marcada diferencia con el resto de los escenarios e indicando la existencia de aportes de origen antrópico.

Análisis de correspondencia entre variables físicas, químicas e hidráulicas. El análisis de correspondencia DCA sintetizó las variables físicas, químicas e hidráulicas de los escenarios (Figura 7), en un primer componente que respondió por el 83,5% y el segundo por el 7,5% de la varianza de los datos. Este arreglo concentró la gran mayoría de las variables medidas y específicamente las que están relacionadas con la velocidad, la concentración de nutrientes de nitrógeno y la presencia de material suspendido o disuelto en el agua, en un mismo componente al que asoció todos los muestreos de las estaciones E1, E2 y E3, que corresponden a los escenarios temporales de intervención minera en el área de estudio. Fuera de este arreglo, quedaron los muestreos del escenario E0 en donde no existe intervención minera y junto a estas se organizaron en el mismo componente los muestreos de la estación E31 que corresponde a la zona previa a la descarga en el escenario de explotación minera actual (E3), lo que permite interpretar que el análisis clasificó los escenarios en dos grupos: sin minería y con minería, asociando a esta última las variables que presentaron diferencias estadísticamente significativas para contaminación por minería.

Discusión

La minería a cielo abierto realizada en Jigualito (Condoto) genera alteraciones en la calidad ambiental de las fuentes hídricas intervenidas y en el ensamblaje de las algas perifíticas que se desarrollan en su interior y que dependen de las condiciones del medio. Estas alteraciones se evidencian de manera específica en las características fisicoquímicas e hidráulicas del agua y a nivel biológico en la riqueza y diversidad de las poblaciones. Aunque parte de estas condiciones

presentan una dinámica temporal que tiende al restablecimiento, dado por la capacidad de resiliencia de estos ambientes luego del disturbio, el cual se evidenció por la agrupación fisicoquímica y biológica de los escenarios sin minería y con 30 años post disturbio, los resultados sugieren que aún con dicha temporalidad este tipo de ambientes todavía se encuentran en proceso de recuperación y no han alcanzado la estabilidad de aquellos que no han sido intervenidos.

El análisis de correspondencia aplicado mostró una mayor correlación entre la velocidad de la corriente, la temperatura, los nitratos, los sólidos suspendidos y la turbiedad con la quebrada Jorobibó (E3) que presenta minería actual, simplificando la interpretación del primer componente a la presencia de material en suspensión en el medio, haciendo de esta característica el proceso más destacable y que acumula en un primer componente casi la totalidad de la varianza de los datos (83,5%), indicando que esta condición es la causa que mejor explica la variabilidad observada en los escenarios, permitiendo inferir que la concentración de material suspendido es una de las características que más determina la dinámica espacio-temporal de las fuentes hídricas de estudio, la cual a su vez tiene una estrecha relación con la actividad minera, que constituye el mayor aportante de estos elementos en los escenarios evaluados.

El agrupamiento de estas variables con la temperatura se sustenta en el incremento que produce una mayor exposición a la radiación solar, como resultado de la deforestación de la matriz de bosque, que se realiza durante la etapa previa a la explotación metalífera. A este respecto, autores como Packer (1967), Patric (1980), Lynch *et al.* (1980), Stadtmuller (1994), Johnson y Jones (2000) y Elosegí y Sabater (2009) han indicado que la tala sustancial de árboles en zonas ribereñas causa un aumento en la temperatura del agua, situación que hizo que los mayores niveles de temperatura se presentaran en las quebradas



Jorobibó (E3) y Sabaleta (E1), donde los bosques asociados han sido talados y donde el proceso de sucesión vegetal aun es incipiente (5 a 10 años) y no alcanza una altura que intercepte la radiación.

La marcada separación entre los escenarios sin disturbio como la quebrada Pichirí (E0) y con más de 30 años de post minería como Sabaleta (E2), quienes en el análisis de correspondencia conformaron el segundo componente junto con el punto aguas arriba del entable minero en escenario de intervención actual (E31), estuvo dada por los bajos de niveles de sólidos suspendidos y turbidez que presentaron entre 0-5 mg/l y 0-8 FAU respectivamente, tal vez como respuesta a la inexistencia de los aportes de sedimentos que hace la minería y al efecto de la temporalidad que favorece la sedimentación de las partículas inicialmente vertidas a los cauces durante la explotación metalífera. Lo que permite indicar que el tiempo beneficia el restablecimiento de las condiciones fisicoquímicas de los cuerpos de agua afectados por minería y que, a mayor tiempo del cese de la actividad, hay una mayor reducción en los niveles de contaminación o alteración del recurso.

En este sentido, se deduce que este comportamiento puede obedecer a los procesos de resiliencia que se desarrollan en los ecosistemas después de un disturbio como la minería, que en primera medida incorpora grandes cantidades de sedimento y arrasa con la disponibilidad de nutrientes, para luego comenzar a decantarlos e iniciar una etapa de autorrecuperación en la que influyen también la restauración de otros elementos como la vegetación asociada y los regímenes climáticos que pueden favorecer el avance de esta etapa. En relación con esto, Baron *et al.* (2003) han indicado que los ecosistemas hídricos son dinámicos y esta condición garantiza el mantenimiento de su viabilidad y resiliencia, la cual, junto con su estructura y funcionamiento, están fuertemente influidos por lo que pasa en la superficie terrestre, resaltando que los factores ambientales dinámicos como el caudal, la entrada

de sedimentos y materia orgánica, las características fisicoquímicas y el ensamble entre plantas y animales, regulan la mayor parte de la estructura y del funcionamiento del ecosistema acuático e influye en las tasas de los procesos que se desarrollan en el mismo.

Las variables como el oxígeno disuelto, el pH y los fosfatos mostraron una tendencia estable entre los escenarios, lo que hizo que además que no presentaran diferencias significativas en el estudio, en el análisis de correspondencia DCA se ubicaran en la mitad de los 4 escenarios evaluados, sugiriendo que el proceso minero no tiene una fuerte incidencia en su comportamiento, lo que puede verse favorecido por la velocidad de flujo de los cuerpos de agua y la alta pluviosidad de la zona, que facilitan la aireación del recurso hídrico y la depuración de iones y otros compuestos que puedan modificar la concentración de estas variables a pesar del disturbio, porque según Jacoby (1990), Mulholland *et al.* (1997) y Schindler (1997), el incremento en los flujos del agua puede diluir los contaminantes, disminuyendo las reacciones químicas y el tiempo de limpieza de los cuerpos de agua.

Los sólidos disueltos y la conductividad presentaron su mayor concentración en el escenario de 30 años de cese de la minería (E2), por lo cual además se alinearon entre sí en el DCA, probablemente porque este escenario presentó condiciones de mínima velocidad y caudal (0,001 m/s, 0,002 m³/s) como resultado de la desviación, modificación del sustrato y aplanamiento del cauce realizado por las dragas mineras, lo que favorece la concentración de material disuelto en el agua con respecto al resto de escenarios evaluados, a lo que se suma una sucesión vegetal avanzada que constituye un aporte natural de materia orgánica, situaciones que además pudieron ocasionar la reducción en el pH y el oxígeno disuelto en este escenario, evidenciando una modificación en los procesos fisicoquímicos de la cuenca.

Lo anterior permite inferir que aunque la tem-

poralidad tiene un efecto en el restablecimiento de algunas características fisicoquímicas en las fuentes hídricas afectadas por la minería a cielo abierto, existen condiciones ambientales de difícil recuperación, debido a la modificación de las características hidráulicas, la reconfiguración del cauce, el cambio en la estructura de la vegetación de ribera y la conectividad que se pierde durante el proceso minero, lo que hace que la dinámica de nutrientes en el sistema se vea modificada. Elosegi y Sabater (2009) han afirmado que todos estos aspectos tienen una incidencia en el funcionamiento y hábitat fluvial.

Conclusiones

La concentración de material suspendido, junto con la temperatura y los nutrientes son las características fisicoquímicas que determinan la dinámica espaciotemporal de los escenarios hídricos disturbados por minería y explican el 83,5% de la variabilidad de los datos obtenidos. Los análisis estadísticos muestran que a mayor temporalidad del cese de la actividad, hay una reducción en los niveles de contaminación del recurso, debido a que disminuyen las concentraciones de estas variables, indicando que el tiempo beneficia el restablecimiento de las condiciones fisicoquímicas de los cuerpos de agua afectados, sin embargo, existen condiciones ambientales de difícil recuperación, debido a la modificación de las características hidráulicas, la reconfiguración del cauce, el cambio en la estructura de la vegetación de ribera y la conectividad que se pierde durante el proceso minero, lo que hace que la dinámica de nutrientes en el sistema se vea modificada aun en escenarios de 30 años de abandono minero.

Es necesario ejercer controles y mejoras en el proceso de operación de la minería a cielo abierto en el área de estudio y en general en las zonas de desarrollo de esta actividad. Estas mejoras deben estar orientadas a evitar el desvío y modificación de los cauces de las fuentes hídri-

cas, porque los cambios de sustrato y pendiente dificultan su proceso de resiliencia fisicoquímica y ecológica. Además, se requiere la aplicación de tratamiento a los vertimientos para evitar el aporte de sedimentos y otros contaminantes que alteren la calidad del agua y la ecología de grupos biológicos importantes como las algas perifíticas que contribuyen a la productividad del ecosistema y a soportar una estructura trófica que favorezca la prestación de bienes y servicios ambientales a las comunidades. Así mismo, las mejoras deben incluir medidas para la recuperación de la vegetación asociada que favorece el intercambio de nutrientes en el ecosistema, la regulación de la temperatura, el control de erosión y facilita el proceso de resiliencia.

Es importante desarrollar nuevos monitoreos de la variables fisicoquímicas y de la comunidad de algas perifíticas en los escenarios estudiados, una vez cuenten con mayores series de tiempo de cese minero y recuperación, lo que permitirá evaluar el efecto del disturbio a temporalidades más largas y establecer aproximaciones o períodos potenciales de estabilización de ecosistemas hídricos intervenidos por minería, de tal manera que se establezcan nuevas alertas ambientales para este sector productivo.

Literatura citada

- Baron JS, Poff NL, Angermeier PL, Dahm CN, Gleick PH, Hairston NG, *et al.* 2003. Sustaining healthy freshwater ecosystems. *Issues in Ecology*, 10: 2-16. <https://bit.ly/3UnkVh3>
- Edding M, Aron A, Berríos M, Flores H, Fonck E, Inda J, *et al.* 1995. Impacto ambiental de los efluentes de la minería del cobre en el sistema hidrobiológico del estero Carén. Coquimbo. Chile Programa de Investigación Codelco-Chile División El Teniente. Universidad Católica del Norte. p. 10.
- Elosegi A, Sabater S. 2009. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Capítulo 7: La vegetación terrestre asociada al río. Madrid: Fundación BBVA. pp. 153-79. <https://bit.ly/3qW9TBG>
- Guzmán D, Ruiz F, Cadena M. 2014. Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación



- media mensual a través del análisis de componentes principales (ACP). Nota Técnica, Subdirección de Meteorología. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 54 pp. <https://bit.ly/3R1guWa>
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, MMA, Ministerio de Medio Ambiente. 2000. Estudio de zonificación ecológica de la región pacífica colombiana. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2012. Protocolo de restauración ecológica de áreas disturbadas por minería, en el Chocó Biogeográfico. Quibdó. Informe Técnico Final del Proyecto. N° 182 de 2011 MADS-IIAP. 340 pp.
- Jacoby HD. 1990. Water quality. In: Climate change and US Water Resources. Waggoner PE (Ed.). New York: John Wiley and Sons. pp. 310-21.
- Johnson SL, Jones JA. 2000. Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Can J Fish Aquat Sci.* 57 (S2): 30-9. doi:10.1139/cjfas-57-S2-30
- Lynch J, Corbett ES, Sopper WE. 1980. Evaluation of management practices on the biological and chemical characteristics of streamflow from forested watersheds. Institute for Research on Land and Water Resources. Pennsylvania: University Park.
- Martin G, Alcalá E, Solà C, Plazuelo A, Burgos MD, Reyes E, *et al.* 2004. Efecto de la contaminación minera sobre el perifiton del río Guadamar. *Limnetica.* 23 (2): 315-29. <https://bit.ly/3SsxMfY>
- Mulholland PJ, Best GR, Coutant CC, Hornsberger GM, Meyer JL, Robinson PJ, *et al.* 1997. Effects of climate change 27 on freshwater ecosystems of the South-Eastern United States and the Gulf Coast of Mexico. *Hydrological Processes.* 11 (8): 949-70. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70019748>
- Packer PE. 1967. Forest treatment effects water quality. In: *Forest Hydrology.* Sopper WE, Lull HW (eds.). New York: Pergamon Press. pp. 687-99.
- Patric JH. 1980. Effects of wood products harvest on forest soil and water relations. *J Environmental Quality.* 9 (1): 73-80. <https://doi.org/10.2134/jeq1980.00472425000900010018x>
- Poveda-M IC, Rojas-P CA, Rudass-LI A, Rangel-Ch JO. 2004. El Chocó Biogeográfico: ambiente físico. En: Rangel-Ch JO ed. *Colombia diversidad biótica. IV. El Chocó Biogeográfico/ Costa Pacífica.* Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Conservación Internacional. pp. 1-22. <https://bit.ly/3Syk4bB>
- Schindler DW. 1997. Widespread effects of climatic warming on freshwater ecosystems in North America. 11 (8): 1043-67. <https://bit.ly/3f5ahv2>
- Stadtmuller T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo, una revisión bibliográfica. CATIE. Proyecto Silvicultura de Bosques Naturales. Serie Técnica, informe técnico N° 240. p. 62. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/235>