



Determinación de cambios en la calidad fisicoquímica del agua por efectos de la minería mecanizada, con especial atención en los períodos de operación y descanso minero en el municipio de Cértegui, Chocó

Determination of changes in the physicochemical quality of water due to the effects of mechanized mining, with special attention to the periods of operation and mining rest in the municipality of Cértegui, Chocó

Yirlesa Murillo Hinestroza^{*ID}, Lady Vargas Porras^{*ID}

Resumen

En el intento de establecer los cambios que la minería a cielo abierto en el municipio de Cértegui, Chocó, Colombia, genera sobre las características fisicoquímicas de ecosistemas hídricos intervenidos por esta actividad productiva, se escogieron cinco fuentes hídricas: las quebradas San Antonio, La Platina, Calochiquito, San Antonito y Regadero. En cada fuente hídrica se hicieron mediciones in situ de variables fisicoquímicas (2 estaciones: antes y después del vertimiento minero), tomando registros durante la operación minera y después de la fase de descanso entre 24 a 48 horas. Los resultados permitieron inferir, que el desarrollo de actividades mineras a cielo abierto, genera mayores cambios en las variables sólidos disueltos (2,19 y 23,6 mg/l) y suspendidos (0 y 750 mg/l), conductividad (4,9 y 55,1 $\mu\text{s/cm}$) y turbiedad (0 y 1000 FAU), que con el desmonte del suelo y el vertimiento directo de los efluentes del proceso a las fuentes hídricas, se genera un arrastre de partículas y material sólido, que modifican estas variables y la calidad fisicoquímica del agua como se evidenció en las estaciones ubicadas después del vertimiento durante los muestreos con operación. En conclusión, los cortos períodos de descanso implementados durante la etapa operativa de la minería favorecen el restablecimiento de algunas variables fisicoquímicas como los sólidos, la velocidad y algunos nutrientes como fosfatos; no obstante, una vez se genera el disturbio minero se producen grandes afectaciones en las estaciones después del vertimiento, que aun con el cese de la actividad, no muestran un restablecimiento total del ecosistema.

Palabras clave: Agua, Cértegui, Minería, Quebradas, Variables fisicoquímicas.

* Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Quibdó, Chocó, Colombia.
e-mail: lady8181@gmail.com
Autor correspondencia:
e-mail: yirdavid@hotmail.com

Recepción: Septiembre 5, 2017
Aprobación: Noviembre 30, 2017
Editor Asociado: Ramírez G.

Abstract

In an attempt to establish the changes that open-pit mining in the municipality of Cértegui, Chocó, Colombia, generates on the physicochemical characteristics of water ecosystems intervened by this productive activity, five water sources were chosen; the streams San Antonio, La Platina, Calochiquito, San Antonito and Regadero. In each water source, measurements were made of physicochemical variables in situ (2 stations: before and after the mining dumping), taking records during the mining operation and after the rest phase of 24 to 48 hours. The results allowed inferring that the development of open pit mining activities generates greater changes in the variables dissolved solids (2.19 and 23.6 mg/l) and suspended (0 and 750 mg/l), conductivity (4.9 and 55.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$) and turbidity (0 and 1000 FAU), since with the clearing of the soil and the direct discharge of the effluents of the process to the water sources, a carry-over of particles and solid material is generated, which modify these variables and the physicochemical quality of the water as evidenced in the stations located after the discharge during the operational samplings. In conclusion, the short rest periods implemented during the mining operational stage favor the reestablishment of some physicochemical variables such as solids, speed and some nutrients such as phosphates, however, once the mining disturbance is generated, great effects are produced in the stations after the dumping, which even with the cessation of activity, do not show a total restoration of the ecosystem.

Keywords: Cértegui, Mining, Physicochemical variables, Quebradas, Water.

Introducción

La minería es el conjunto de actividades

referentes al descubrimiento y la extracción de minerales que se encuentran debajo de la superficie de la tierra; estos minerales pueden ser metales (oro y cobre) y no metales (carbón, amianto, grava) (Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales, 2004). En este contexto, en el municipio de Cértegui, se ha venido realizando históricamente una actividad minera artesanal la cual es denominada de “barequeo”, donde no se utilizan grandes máquinas, sino, por el contrario, es la mano del hombre la que extrae de manera muy artesanal el mineral y obviamente en pequeñas cantidades. No obstante, en los últimos años se han introducido retroexcavadoras, dragas, planchones y motobombas utilizadas para ejercer la actividad (González *et al.* 2013).

Cabe resaltar que la minería ha sido la principal actividad y fuente de ingresos económicos para las poblaciones aledañas a Cértegui. Sin embargo, el desarrollo de la actividad a cielo abierto ha dado lugar a diferentes alteraciones en el medio ambiente y de manera específica a las fuentes hídricas representadas en las quebradas San Antonio, La Platina, Calochiquito, San Antonito y Regadero, las cuales son de gran importancia para las comunidades gracias a la multiplicidad de bienes y servicios prestados por las mismas y que las convierte en fuente de sustento y desarrollo. A partir de todo lo expuesto y teniendo en cuenta la importancia de los ecosistemas hídricos, se presenta la siguiente investigación orientada a la determinación de cambios en la calidad fisicoquímica del agua en fuentes hídricas disturbadas por minería, a partir del análisis de períodos de operación y descanso minero.

Metodología

Área de estudio. El área de estudio abarcó cinco fuentes hídricas intervenidas por actividad minera a cielo abierto en el municipio de Cértegui: San Antonio, La Platina, Calochiquito, San Antonito y Regadero (Figura 1).

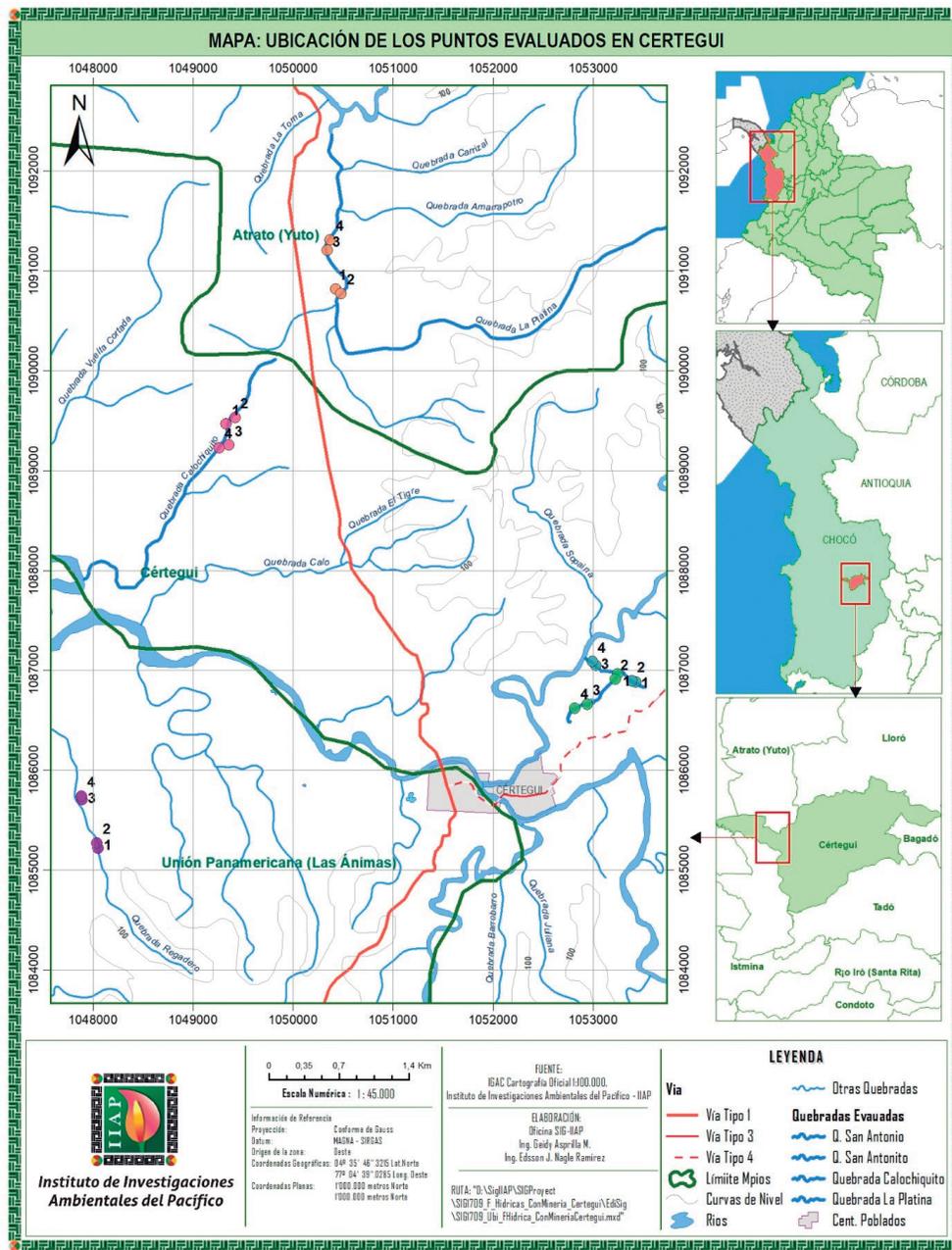


Figura 1. Localización geográfica de los puntos evaluados en las diferentes fuentes hídricas.

Registro con coordenadas de los puntos de muestreo establecidos en las fuentes hídricas en el municipio de Cértegui. Los números en negrilla indican las localidades.

COLOMBIA: Chocó, Cértegui. **Q. SAN ANTONIO**, 1. (05°22'56.6" N 076°35'49.7" W), 2. (05°22'55.1" N 076°35'50.5" W), 3. (05°22'46.8" N 076°35'59.6" W), 4. (05°22'45.5" N 076°36'03.5" W); **Q. LA PLATINA** 1. (05°25'02.2" N 076°37'21.0" W), 2. (05°25'00.7" N 076°37'19.4" W), 3. (05°25'14.8" N 076°37'23.9" W), 4. (05°25'18,1 N 076°37'22.9" W); **Q. CALITO** 1. (05°24'18.2" N 076°37'56.7" W), 2. (05°24'20.3" N 076°37'53.8" W), 3. (05°24'11.3" N 076°37'55.8" W), 4. (05°24'10.5" N 076°37'59.0" W); **Q. SAN ANTONITO** 1. (05°22'54.0" N 076°35'43.8" W), 2. (05°22'54.4" N 076°35'45.1" W), 3. (05°22'59.5" N 076°35'56.8" W), 4. (05°23'00.7" N 076°35'57.9" W); **Q. REGADERO** 1. (05°22'00.1" N 076°38'38.4" W) 2 (05°22'01.8" N 076°38'38.7" W) 3 (05°22'15.9" N 076°38'43.5" W) 4 (05°22'17.0" N 076°38'43.7" W)



Figura 2. 1. Q. San Antonio. 2. Q. Calochicquito. 3. Q. La Platina. 4. Q. San Antonito. 5. Q. Regadero. a. antes del vertimiento; b. después del vertimiento para todas las fuentes. Q: Quebradas

Características de las fuentes hídricas evaluadas. En la parte alta (antes del vertimiento) estos ecosistemas se encontraron en su estado natural, de ahí que hayan presentado aguas transparentes con un espejo de agua de un metro de profundidad aproximadamente y lechos arenoso pedregoso, con una alta cubierta vegetal. En la parte media (después de los vertimientos) estos cuerpos de agua se encontraron alterados, presentado aguas muy turbias y sedimentadas, con cauces muy desviados y lechos fangoso arenoso desprovisto de vegetación ribereña (Figura 2).

Determinación de la calidad fisicoquímica de las fuentes hídricas afectadas por minería. Para determinar la calidad fisicoquímica de fuentes hídricas afectadas por minería a cielo abierto en el municipio de Cértegui, se establecieron dos estaciones de muestreos: la primera antes del vertimiento minero y la segunda después del vertimiento. En cada estación se seleccionaron dos puntos de muestreo para un total de cuatro puntos por cada fuente hídrica. Además, en cada fuente

se realizaron muestreos tanto en el período de operación como después del descanso de 24 a 48 horas, para un total de diez muestreos. Finalmente, en cada punto se realizaron mediciones *in situ* de variables fisicoquímicas como temperatura, oxígeno disuelto, pH, turbiedad, sólidos suspendidos y disueltos, además, de nutrientes como el nitrato, nitrito y fosfato, utilizando un multiparámetro Hach HQ y un colorímetro portátil HACH DR 900. Además, cada punto fue georreferenciado con la ayuda de un GPS Garmin Map 60 CS.

Por otra parte, para analizar el estado y la conservación de los diferentes cuerpos de agua como ecosistema prioritario para el establecimiento de grupos biológicos, se hicieron comparación de los datos obtenidos con los estándares de calidad para preservación de fauna y flora (Decreto 1594/84), así como con los datos arrojados por otras investigaciones de calidad de agua en fuentes superficiales intervenidas; a su vez, los resultados se relacionaron con las observaciones realizadas en campo sobre el estado del agua, su dinámica de



flujo y su interacción con componentes biológicos. Se realizó además un análisis de componentes principales (ACP) y por último, para mirar qué variables fisicoquímicas e hidráulicas registraban diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con el valor de p , se aplicó la prueba W de Mann-Whitney. Todo lo anterior se realizó en el programa estadístico CANOCO versión 4.5.

Resultados

Caracterización fisicoquímica e hidráulica de las estaciones de cada fuente hídrica intervenida por minería. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los estadígrafos de las variables hidráulicas y fisicoquímicas para cada una de las estaciones evaluadas, y los valores de W y p teniendo en cuenta como factor de discriminación tanto el período de operación y descanso, como la ubicación de las estaciones con respecto al vertimiento (antes y después).

La velocidad, la temperatura, el oxígeno disuelto y los nitritos, presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los muestreos con y sin operación minera, evidenciando un comportamiento diferencial de estas variables entre estaciones y muestreos. Contrario a esto, las variables: caudal, pH, conductividad, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, turbiedad y nutrientes como el nitrato y fosfato, no presentaron diferencias significativas con y sin operación sugiriendo una conducta homogénea entre las estaciones.

La velocidad mostró un comportamiento fluctuante entre estaciones y muestreos con un coeficiente de variación entre 29,7 y 68,2. Los valores medios oscilaron entre 0,21 y 0,31 m/s, con un valor mínimo de 0,05 m/s y un máximo de 0,72 m/s, ambos ubicados en las estaciones antes y después del vertimiento con operación, lo que sugiere que a pesar de que el comportamiento de esta variable depende por lo general de las características morfométricas de las estaciones, puede verse influido por la actividad minera, de

ahí que haya presentado diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos ($p < 0,05$).

Por su parte, el caudal osciló entre 0,01 y 1,52 m³/s, evidenciándose el máximo valor en la estación después del vertimiento sin operación. La desviación estándar (0,30, 0,47), mostró poca dispersión de los datos con valores cercanos entre la mayoría de las estaciones. El coeficiente de variación se mantuvo entre 102,9% y 119,1% mostrando una alta variabilidad en los datos registrados, con un incremento notable en la segunda estación. Pese a lo anterior esta variable no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) para el análisis realizado.

Los valores medios de oxígeno disuelto fluctuaron entre 6,64 y 7,68 mg/l, evidenciándose una alta disponibilidad de este elemento en el agua para todas las estaciones de muestreo tanto con operación como durante los períodos de descanso minero (Tabla 1). El coeficiente de variación presentó valores bajos entre 4,2% y 15,2% mostrando una poca dispersión en los datos, al igual que poca desviación entre las estaciones (0,31 y 1); sin embargo, esta variable presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las mediciones realizadas durante la operación y el descanso minero.

De igual manera, el pH presentó pocas variaciones entre los datos, con un valor mínimo de 4,37, y máximo de 9,5 (Figura 3). Su coeficiente de variación se mantuvo entre 20% y 30%, mostrando poca variabilidad, de ahí que se hayan arrojado bajos valores de desviación estándar (1,20 y 1,81) y que el comportamiento equilibrado entre los datos no haya generado diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones con valores de ($p > 0,05$).

En cuanto a la temperatura, varió entre 24 y 30,4°C, evidenciando aguas cálidas en todas las estaciones tanto con operación como en descanso minero. Los mayores reportes se ubicaron en la estación después del vertimiento con operación, como consecuencia de un ambiente desprovisto

Tabla 1. Resultados de estadígrafos de tendencia central y de dispersión de las variables hidráulicas y fisicoquímicas por estación; valores p de Mann Whitney con un nivel de confianza del 95% teniendo en cuenta como factores de discriminación los períodos de operación y descanso minero

Estación	Estadígrafo	VEL (m/s)	Q (m³/s)	T (°C)	pH	CON (µs/cm)	TDS (mg/l)	OD (mg/l)	% O disuelto	SS (mg/l)	TUR (FAU)	NO ³ (mg/l)	NO ² (mg/l)	PO ⁴ (mg/l)
Estaciones antes de vertimiento con operación EAI	Media	0,21	0,29	25,83	5,97	5,72	2,57	7,47	92,91	3,40	4,10	0,02	0,01	0,33
	Min	0,05	0,01	25,3	4,39	4,90	2,19	6,86	86,00	0,00	0,00	0,01	0,005	0,04
	Max	0,46	0,97	26,50	9,50	6,74	3,02	7,78	96,4	16,00	15,00	0,04	0,04	0,87
	DE	0,11	0,301	0,41	1,81	0,71	0,32	0,31	3,68	4,94	4,48	0,01	0,01	0,31
	CV	56,39	103,65	1,62	30,35	12,55	12,61	4,20	3,97	145,55	109,35	52,70	69,56	93,85
Estaciones después del vertimiento con operación EDI	Media	0,26	0,39	27,73	5,62	12,97	5,628	6,64	88,4	551	726,6	0,02	0,02	1,04
	Min	0,08	0,01	26,20	4,37	6,20	2,68	4,68	60,30	56,00	63,00	0,01	0,001	0,02
	Max	0,72	1,35	30,40	8,00	55,10	23,60	7,68	102,10	750,00	1000,00	0,03	0,06	2,50
	DE	0,18	0,45	1,37	1,20	15,03	6,42	1,008	13,72	320,67	440,34	0,008	0,02	0,99
	CV	68,21	115,30	4,94	21,36	115,85	114,10	15,18	15,52	58,20	60,60	32,43	93,09	94,66
Estaciones antes de vertimiento en descanso EAO	Media	0,27	0,31	24,99	6,62	5,93	2,68	7,60	92,82	4,10	4,50	0,01	0,005	0,38
	Min	0,15	0,04	24,8	4,45	4,95	2,21	6,57	80,80	0,00	0,00	0,00	0,003	0,02
	Max	0,51	1,02	25,50	9,10	6,93	3,19	8,02	97,20	19,00	19,00	0,03	0,01	1,00
	DE	0,11	0,37	0,26	1,56	0,72	0,35	0,45	5,15	5,48	5,66	0,01	0,002	0,33
	CV	41,47	119,12	1,06	23,57	12,23	13,36	5,94	5,55	133,81	125,82	63,07	45,51	87,07
Estaciones después del vertimiento en descanso EDO	Media	0,31	0,45	25,23	6,17	6,96	3,23	7,63	171,97	57,50	56,80	0,01	0,01	0,30
	Min	0,15	0,02	24,00	4,57	5,42	2,47	6,89	9,20	0,00	0,00	0,00	0,002	0,00
	Max	0,53	1,52	26,80	8,20	9,61	4,28	8,24	959,00	263,00	264,00	0,03	0,02	0,98
	DE	0,09	0,47	0,85	1,24	1,65	0,67	0,47	277,85	104,24	102,35	0,01	0,007	0,35
	CV	29,75	102,98	3,39	20,14	23,75	20,83	6,23	161,57	181,30	180,19	84,37	78,02	117,36
W entre el período de operación y descanso		277,00	216,00	28,50	259,00	175,00	196,00	303,00	229,50	145,50	139,50	144,50	94,00	161,50
P entre el período de operación y descanso	0,03	0,67	0,00	0,11	0,50	0,92	0,005	0,43	0,14	0,10	0,11	0,004	0,30	
W entre las estaciones antes y después		250,00	233,00	273,50	175,00	320,00	323,00	154,50	193,50	366,50	366,00	229,50	233,00	219,50
P entre las estaciones antes y después		0,17	0,37	0,04	0,50	0,001	0,0009	0,22	0,91	0,000006	0,000006	0,40	0,37	0,60

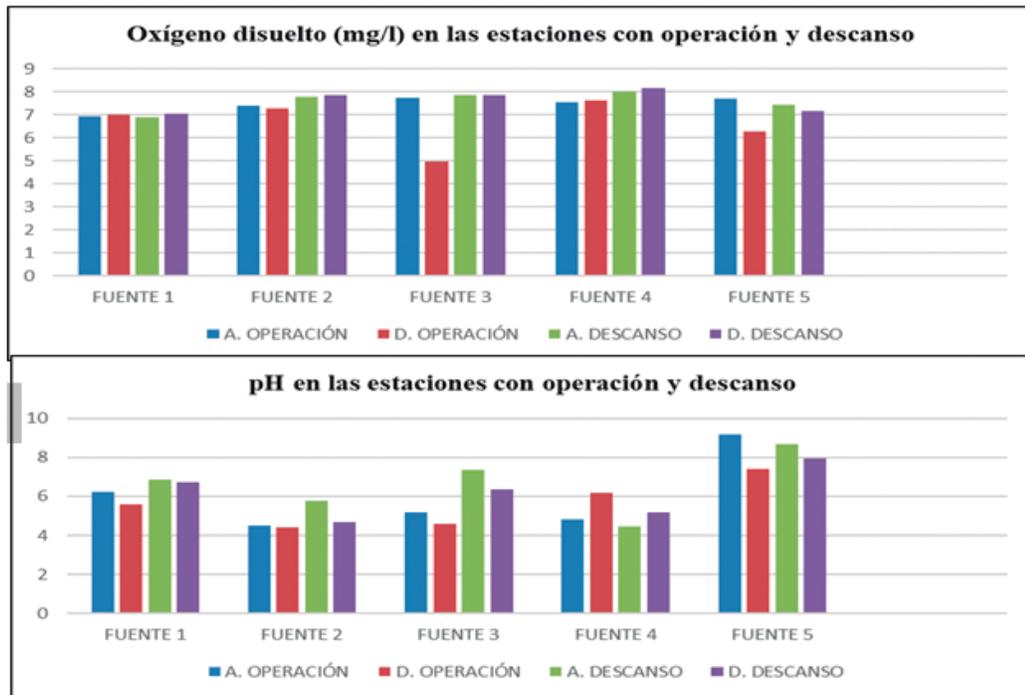


Figura 3. Disponibilidad de oxígeno y pH en las estaciones con operación y descanso minero.

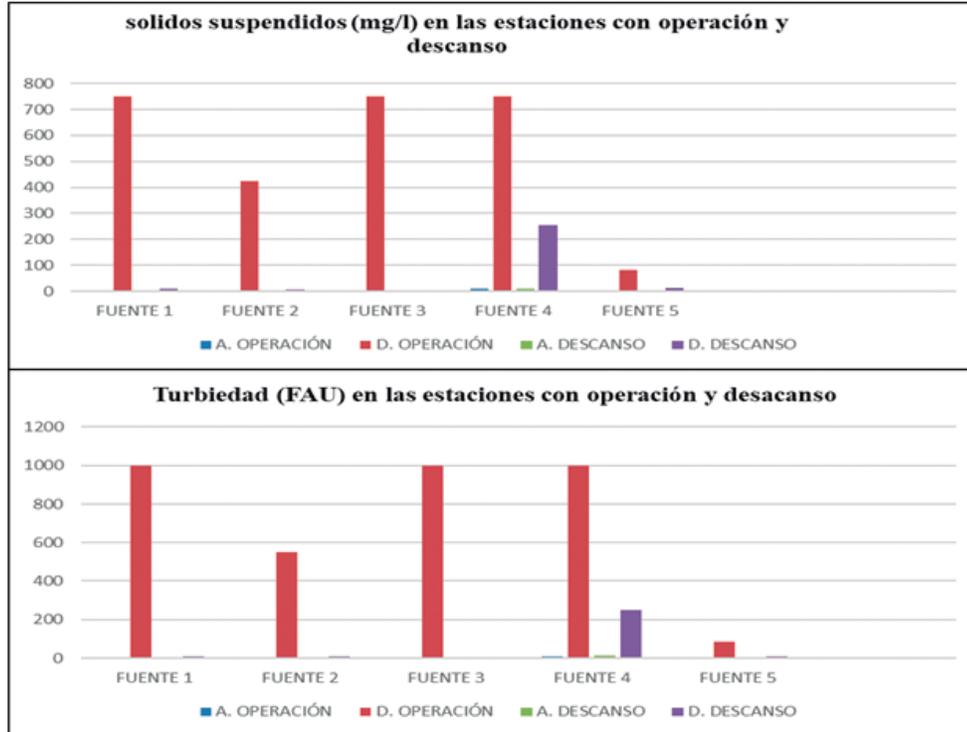


Figura 4. Datos de sólidos suspendidos y turbiedad en las estaciones con operación y descanso minero.

de vegetación, donde una mayor exposición a las radiaciones solares, pueden incrementar los niveles de esta variable. En contraste, los valores más bajos se registraron en los puntos antes del vertimiento debido a la presencia de vegetación riberrina continua, típica en un área en condiciones naturales. Se evidenció poca dispersión de los datos con una baja desviación estándar entre 0,26 y 1,37, sin embargo, esta variable presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los muestreos realizados con operación y durante descanso minero.

La conductividad mostró fluctuaciones en su comportamiento entre estaciones, osciló entre 4,9 y 55,1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ registrando tanto sus concentraciones más altas como su valor máximo en las estaciones ubicadas después del vertimiento, durante los muestreos realizados con operación minera (Figura 4), lo que evidencia la influencia del disturbio en sus concentraciones, teniendo en cuenta que la remoción del suelo y el vertimiento de sedimentos efectuado durante la explotación de metales puede incrementar el aporte y la disolución de iones en el agua, de ahí que esta variable presentara diferencias significativas en relación con el factor de ubicación de la estación con respecto al vertimiento minero ($p < 0,05$). En general, se presentaron bajos coeficientes de variación (entre 12,15 y 23,75) al igual que una desviación estándar (0,71 y 1,65). No obstante, en la estación, después del vertimiento con operación, se presentó el valor máximo del coeficiente de variación (115,85), lo que demuestra cierta influencia de la minería en esta variable. A pesar de lo anterior, la conductividad no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre los muestreos con operación y descanso minero.

Los sólidos disueltos por su parte, mostraron un comportamiento similar al de la conductividad, fluctuaron entre 2,19 y 23,6 mg/l, observándose los mayores niveles después del vertimiento con operación, de ahí que el mayor coeficiente de variación, se haya generado en esa estación con

un valor de 114,10. Solo presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre estaciones ubicadas antes y después del vertimiento.

En lo concerniente a los sólidos suspendidos, presentaron fuertes fluctuaciones entre las estaciones y los muestreos, sus concentraciones oscilaron entre 0 y 750 mg/l, contrastando valores muy bajos registrados siempre antes del vertimiento con operación y descanso minero y los valores máximos en los puntos ubicados después del vertimiento durante los muestreos con operación minera, lo que se puede atribuir al disturbio ocasionado por la minería, que durante su etapa operativa vierte de manera directa sus efluentes cargados de material sólido proveniente de las capas de suelo removidas, generando un incremento en las concentraciones de sólidos suspendidos y turbidez. En consecuencia, los estadígrafos como desviación y coeficiente de variación presentaron sus valores más altos en estas mismas estaciones y el valor de $p < 0,005$ indica diferencias estadísticamente significativas al comparar los datos obtenidos entre los muestreos realizados antes y después del vertimiento para ambas variables.

Respecto a la turbiedad, se presentaron fluctuaciones proporcionales al comportamiento de los sólidos suspendidos, registrando valores entre 0 y 1000 FAU entre estaciones y muestreos. La mayor dispersión y variabilidad en los datos, se localizó en las estaciones después del vertimiento durante los períodos de operación y descanso de la extracción de metales (Tabla 1, Figura 4), lo que permite inferir una alta influencia de la minería en esta variable, que a su vez se ve reducida con el cese de la actividad durante los períodos de descanso, situación que pudo favorecer la similitud en los datos de las estaciones ubicadas antes y después del vertimiento para ambas variables (sólidos suspendidos y turbiedad), lo que hizo que estas no presentaran diferencias estadísticamente significativas teniendo en cuenta como factor de comparación el período de operación y descanso ($p > 0,05$).

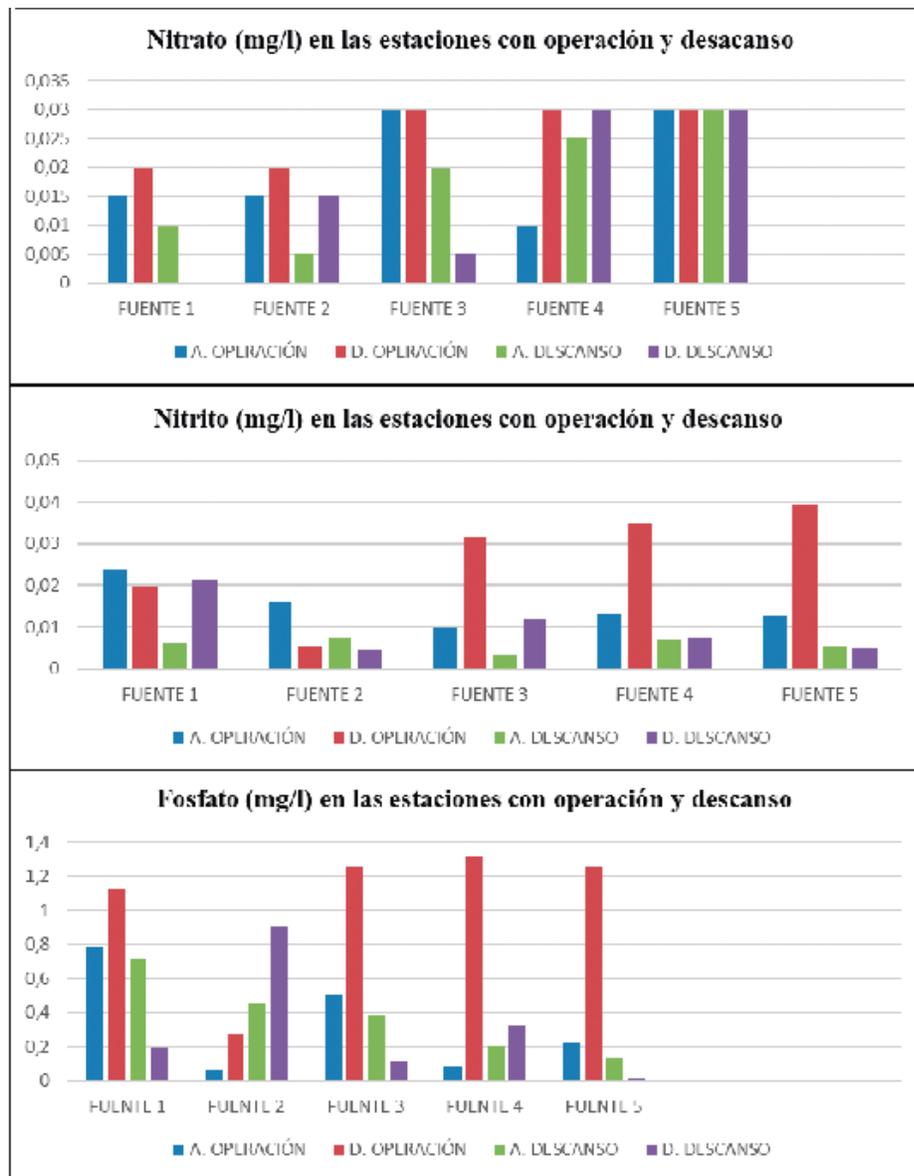


Figura 5. Datos de nitrato, nitrito y fosfato en las estaciones con operación y descanso minero.

Referentes a los nutrientes, los valores de nitrito oscilaron entre 0,001 y 0,06 mg/l, observándose que los mayores valores se concentraron en la estación después del disturbio minero con operación (Figura 5). Los valores medios oscilaron entre 0,005 y 0,02 mg/l y los valores de desviación estándar no superaron los 0,02, denotándose una cercanía de los datos a la media. Esta variable presentó diferencias estadísticamente significativas con operación y descanso ($p < 0,05$).

Los nitratos, tuvieron un comportamiento simi-

lar entre las estaciones tanto en operación como en descanso. Oscilaron entre 0 y 0,04 mg/l para la estación antes del vertimiento con y sin operación y entre 0 y 0,03 mg/l para la estación después del vertimiento con y sin operación (Figura 5). El coeficiente de variación no superó el 84,3 y se encontraron bajas desviaciones estándar que oscilaron entre 0,00 y 0,01 entre las estaciones. La similitud entre los datos encontrados en la mayoría de las estaciones, generó que la diferencia entre sus datos no presentará diferencias

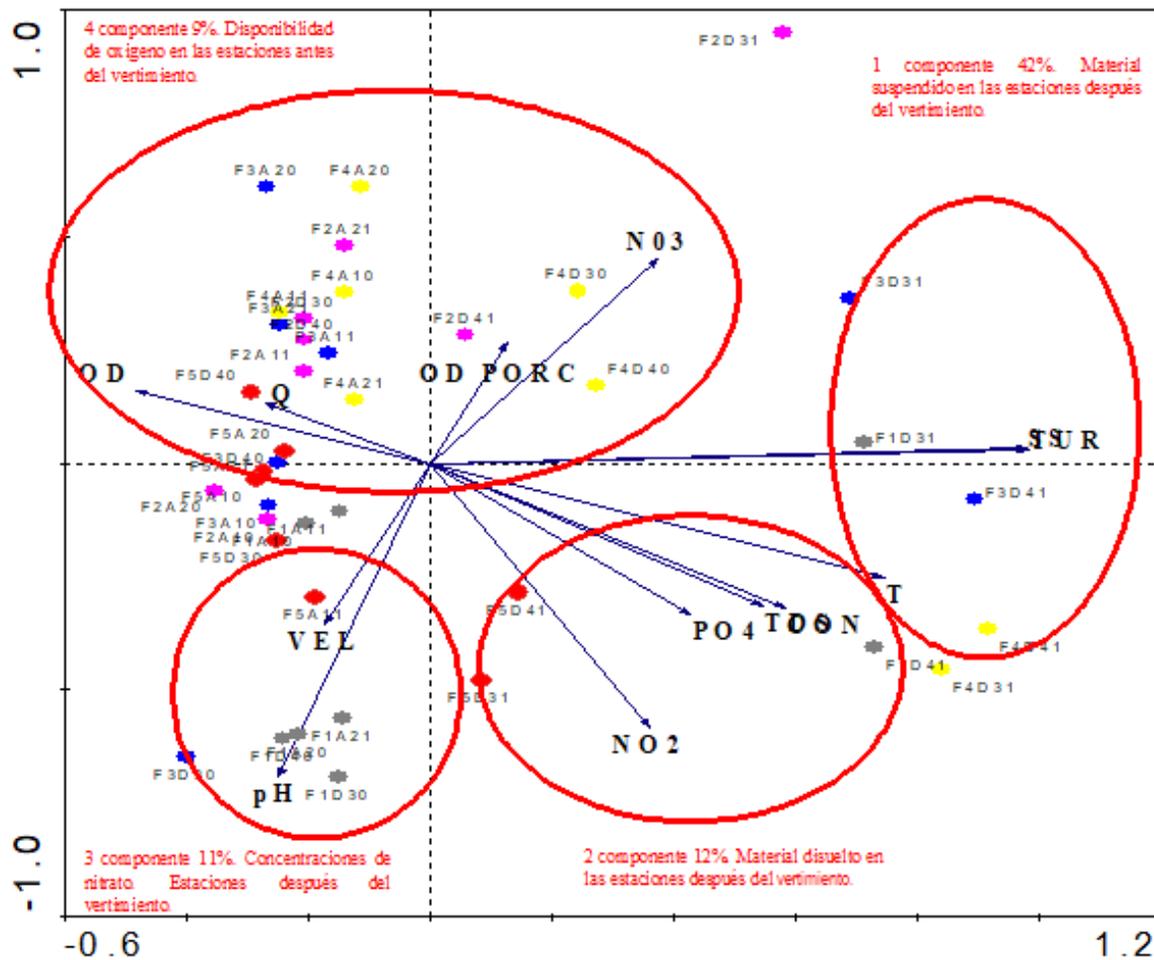


Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) entre estaciones, períodos de muestreo y variables ambientales. Donde los puntos en color representan las cinco fuentes hídricas muestreadas, la A corresponde a las estaciones ubicadas antes del vertimiento minero (1, 2) y la D a las estaciones después del mismo (3, 4). Los códigos terminados en 1 corresponden a mediciones realizadas durante la operación minera y los terminados en 0 a aquellos realizados durante el período de descanso de la operación minera.

estadísticamente significativas con operación y descanso ($p > 0,05$).

De otro lado, los fosfatos mostraron una uniformidad de los datos tanto en las estaciones antes del vertimiento con operación y descanso, como en las estaciones después del vertimiento sin operación con valores que no superaron los 0,87 y 0,98 mg/l respectivamente. Solo se observaron diferencias notables en la estación después del vertimiento con operación, en la cual se alcanzaron concentraciones de 2,5 mg/l que pueden relacionarse con los aportes provenientes del proceso

minero (Figura 5). El coeficiente de variación osciló entre 87,1% y 117,4% entre estaciones y se encontraron desviaciones estándar por debajo de los 0,99. Esta variable no presentó diferencias significativas entre muestreos con operación y descanso minero ($p > 0,05$).

De otro lado, el análisis de componentes principales PCA sintetizó los patrones fisicoquímicos e hidrológicos de las quebradas analizadas en 4 componentes que explicaron el 74% de la variabilidad de los datos (Figura 6). El primer componente respondió por el 42% de la varianza



total y fue el grupo de variables con mayor peso en el análisis, el cual incluyó los sólidos suspendidos, la turbiedad y la temperatura, mostrando que la cantidad de material suspendido en el agua en asoció con la cantidad de calor, son las condiciones que más explican los cambios que se presentan en los ecosistemas hídricos que son afectados por minería. Un segundo componente explicó la cantidad de material disuelto en el agua agrupando los sólidos disueltos, nitritos, fosfatos y oxígeno disuelto, los cuales respondieron por el 12% del total de la varianza, lo que indica que en los dos primeros componentes se acumuló el 54% de la misma. En el tercer y cuarto componente se concentró el 11% y 9% respectivamente, relacionando las variables velocidad y pH para el primer caso y la disponibilidad de oxígeno junto con el caudal y la concentración de nitratos para el último.

El ACP muestra la existencia de un gradiente ambiental marcado por la ubicación de la intervención minera y los períodos de operación y descanso. Se observa que todos los muestreos realizados en las estaciones ubicadas después del vertimiento minero durante la operación minera (puntos D31 y D41), se asociaron con los dos primeros componentes y en mayor medida al primero que está relacionado con la cantidad de material suspendido en el agua, evidenciando que los niveles de material disuelto y suspendido tanto de origen orgánico como inorgánico, son las variables que más se afectan con el disturbio minero, debido a la remoción de las capas del suelo que se realiza durante la extracción del metal y el posterior vertimiento directo del lavado de las mismas.

El gradiente identificado evidencia un incremento en el número de muestreos que se asocian con los componentes 3 y 4, en los cuales se ordenaron la gran mayoría de las mediciones realizadas en las estaciones antes del vertimiento tanto durante la operación como en el descanso minero (A10, A20, A11, A21), así como también

todos los muestreos ubicados después del vertimiento durante el período de descanso (D30, D40), evidenciando que este tiene un efecto en la reducción de las concentraciones de material suspendido en el agua, dada la ordenación de estas mismas estaciones junto con los componentes 1 y 2 durante la operación minera.

Discusión

Los resultados de la caracterización fisicoquímica en cada una de las estaciones, permiten inferir que el desarrollo de actividades mineras a cielo abierto genera mayores cambios en las variables sólidos disueltos (2,19 y 23,6 mg/l), suspendidos (0 y 750 mg/l), conductividad (4,9 y 55,1 $\mu\text{s}/\text{cm}$) y turbiedad (0 y 1000 FAU), porque con el desmonte del suelo, el lavado del material litológico retirado y el vertimiento directo de los efluentes del proceso a las fuentes hídricas, se genera un arrastre de partículas y material sólido, que modifican dichas variables y la calidad fisicoquímica del agua, lo que se evidenció en una marcada diferencia entre las concentraciones obtenidas en las estaciones ubicadas antes y después del vertimiento, que generó que este grupo de variables presentaran diferencias significativas ($p < 0,05$) al tener como factor de comparación la ubicación de las estaciones con respecto al vertimiento. Lo anterior coincide con Sánchez y Cañón (2010), quienes expresan que la minería es probablemente la causante del mayor impacto en la calidad del agua debido al aporte de sólidos, que llegan a las fuentes hídricas y ocasionan problemas de sedimentación, aumento de la turbiedad y cambios en las características hidráulicas y geomorfológicas que afectan la vida acuática.

A lo anterior se suma lo reportado por IIAP (2014), en otras áreas disturbadas con minería como río Quito en donde se registraron altos valores de sólidos suspendidos y turbiedad 770 mg/l y 1100 FAU, que obedecen al cúmulo de material aportado por la minería practicada directamente

sobre el cauce de los cuerpos de agua y que podría constituir una restricción en el desarrollo de la vida acuática y sus procesos biológicos, porque al modificar la turbiedad del agua se afectan procesos tan importantes como la fotosíntesis, la cual a su vez es responsable de la producción primaria en el ecosistema y el mantenimiento de las cadenas tróficas en el mismo, situación corroborada por Seoáñez (1999), quien expresa que niveles altos de turbidez originados por materia orgánica, arcilla y material en suspensión reducen la luz en el agua, ocasionando que esta pierda habilidad de apoyar la diversidad de organismos acuáticos.

También se evidencia que con el cese de la actividad minera durante los períodos de descanso, se genera una reducción en las concentraciones de estos parámetros, favorecido por procesos de sedimentación, que sugiere una clarificación del agua como consecuencia de una disminución de la turbiedad.

En adición, se evidenció que la minería tiene una alta incidencia en nutrientes como los fosfatos que alcanzaron concentraciones de 2,5 mg/l en la estación después del vertimiento con operación, lo cual afecta la calidad del agua y las especies biológicas como las algas que se desarrollan en este medio. Pütz (2009), aduce que los fosfatos existen en forma disuelta, coloidal o sólida y que cualquier aumento de este a causa de un disturbio, impide la reproducción y el crecimiento de las algas en el agua. Sumado a esto, Roldán (2003), expresa que el aumento de este nutriente puede ser un componente limitante para el desarrollo de las comunidades acuáticas y generar eutrofización, lo que demuestra las graves afectaciones generadas por este tipo de disturbio.

En cuanto al análisis del PCA los resultados obtenidos soportan lo explicado alrededor de la caracterización fisicoquímica del agua, pues se evidenció que los mayores porcentajes de la varianza total de los datos respondieron a los componentes uno (42%) y dos (12%), agrupándose en el primer caso variables como los sólidos

suspendidos, turbiedad y la temperatura y en el segundo caso los sólidos disueltos, conductividad, nitritos y fosfatos.

Se evidencia que las condiciones de calor, junto con la cantidad de material suspendido en el agua son los aspectos que más demuestran las consecuencias relacionadas con los procesos mineros, teniendo en cuenta que la agrupación de estas variables se dio en todos los muestreos realizados en las estaciones ubicadas después del vertimiento durante la operación minera (puntos D31 y D41).

La gran cantidad de material sólido en suspensión, como arcillas, cieno o materia orgánica e inorgánicas finamente divididas que se originan durante la realización de la actividad minera trae consigo altas turbiedades y concentraciones de sólidos que limitan el paso de la luz y con ello el proceso de fotosíntesis, de ahí que aumentos de estas variables generen efectos tanto en las condiciones fisicoquímicas del ecosistema como en los procesos ecológicos que dependen de estas condiciones. Conforme a esto, González (2011) manifiesta que a nivel fisicoquímico un aumento de partículas reduce la transparencia y genera sedimentación disminuyendo la capacidad de retención de agua de estos ambientes, mientras que a nivel ecológico se puede afectar la fotosíntesis por la limitación en el paso de la luz solar y suprimiendo la producción primaria (Gil 2014). Estos reportes junto con los resultados mostrados por el PCA corroboran las alteraciones que se derivan de la actividad minera en los ecosistemas acuáticos, inmediatamente se genera el disturbio.

Conclusiones

El desarrollo de actividades mineras a cielo abierto, genera mayores cambios en las variables sólidos disueltos (2,19 y 23,6 mg/l) y suspendidos (0 y 750 mg/l), conductividad (4,9 y 55,1 $\mu\text{s}/\text{cm}$) y turbiedad (0 y 1000 FAU), ya que con el desmonte del suelo, el lavado del material litológico



retirado y el vertimiento directo de los efluentes del proceso a las fuentes hídricas, se genera un arrastre de partículas y material sólido, que modifican estas variables y la calidad fisicoquímica del agua como se evidenció en la estación ubicada después del vertimiento durante los muestreos con operación, razón por la cual las variables presentaron diferencias estadísticas significativas entre las estaciones con valores de ($p < 0,05$).

El cese de la actividad minera durante los períodos de descanso genera una reducción en las concentraciones de sólidos y turbiedad, favorecido por procesos de sedimentación, que sugiere una clarificación del agua como consecuencia de una disminución de la turbiedad.

Por su parte, el análisis de componentes principales PCA manifestó la existencia de un gradiente ambiental marcado por la ubicación de la intervención minera y los períodos de operación y descanso. Los mayores porcentajes de la varianza total de los datos respondieron a los componentes uno (42%) y dos (12%), agrupándose en el primer caso las variables como los sólidos suspendidos, turbiedad y la temperatura y en el segundo caso los sólidos disueltos, conductividad, nitritos y fosfatos. Esto demostró que las condiciones de calor, junto con la cantidad de material suspendido en el agua, son los aspectos que más demuestran las consecuencias relacionadas con los procesos mineros, teniendo en cuenta que la agrupación de estas variables se dio en todos los muestreos realizados en las estaciones ubicadas después del vertimiento durante la operación minera (puntos D31 y D41).

En síntesis, los cortos períodos de descanso implementados durante la etapa operativa de la minería favorecen el restablecimiento de algunas variables fisicoquímicas como los sólidos, la velocidad y algunos nutrientes como fosfatos, no obstante, una vez se genera el disturbio minero se producen grandes afectaciones en las estaciones

después del vertimiento, que aun con el cese de la actividad, no muestran un restablecimiento total del ecosistema.

Literatura citada

- Gil JA. 2014. Determinación de la calidad del agua mediante variables físico químicas, y la comunidad de macroinvertebrados como bioindicadores de calidad del agua en la cuenca del río Garagoa. Tesis de grado Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales: Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas, Universidad de Manizales. 88 pp. Disponible en: <https://cutt.ly/7UDzAEC>
- González C. 2011. Monitoreo de la calidad del agua, la turbidez. Recinto universitario de Mayagüez, Universidad de Puerto Rico.
- González L, Espitia C, Munar PJ, de la Hoz A, Sánchez LF. 2013. Impacto de la minería de hecho en Colombia. Estudios de caso: Quibdó, Istmina, Timbiquí, López de Micay, Guapi, El Charco y Santa Bárbara. Bogotá: Instituto de Estudios para el Desarrollo y la Paz-INDÉPAZ. Disponible en: <https://cutt.ly/VUDxfQ5>
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP). 2014. Evaluación de la calidad fisicoquímica y ecológica del río Quito como herramienta de análisis de los impactos ocasionados por la minería y su importancia ecosistémica y sociocultural. Quibdó: IIAP. 124 pp.
- Ministerio de Agricultura. 1984. Decreto 1594 de 1984. Bogotá: MinAgricultura; 55 pp. Disponible en: <https://cutt.ly/FUB8TvK>
- Pütz P. 2009. Informe práctico. Analítica de laboratorio y sistema de control de proceso. Nutrientes fosfato. Eliminación y determinación de fosfato. Vizcaya: HACH-LANGE. 4 pp. Disponible en: <https://cutt.ly/qUDcxla>
- Roldán G. 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/Col. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. 170 pp. Disponible en: <https://cutt.ly/yUB4y8n>
- Sánchez DE, Cañón JE. 2010. Análisis documental del efecto de vertimientos domésticos y mineros en la calidad del agua del río Condoto (Chocó, Colombia). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. pp. 115-30. Disponible en: <https://cutt.ly/4UDcN1D>
- Seoáñez M. 1999. Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio natural continental. 2ª ed. Madrid: Editorial Mundi-Prensa. 701 pp. Disponible en: <https://cutt.ly/yUDvliL>