

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIAL EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO MINERO SAN RAMON (RED EAGLE) APLICANDO HERRAMIENTAS SIG Y QUAL2Kw

Melissa Hurtado Álvarez¹, Cristian Felipe Gómez Vásquez²

¹Ingeniera Biológica, Universidad Nacional de Colombia

²Ingeniero Ambiental, Universidad de Antioquia

Junio 14 de 2019

RESUMEN:

El estudio desarrollado ha tenido como objetivo, modelar la calidad de tres cuerpos de agua que se encuentran en la zona de influencia directa del proyecto minero San Ramón de la empresa Red Eagle Mining de Colombia, en el municipio de Santa Rosa de Osos mediante indicadores de contaminación como el ICOSUS, ICOMI e ICOMO y, representar gráficamente a través de herramientas SIG (interpolaciones IDW) el cambio de la calidad de éstos debido a la actividad minera de la zona. En principio, se contó con el insumo, provisto por la empresa Red Eagle Mining de Colombia y Corantioquia (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia), de caracterizaciones hidráulicas y de parámetros fisicoquímicos en 3 puntos de la quebrada “Caño La Veta”, 3 puntos de la quebrada “San Ramón” y 3 puntos de la quebrada “San Francisco”, para el periodo comprendido entre los años 2012 y 2017. Con el objetivo de aumentar la cantidad de puntos con información, para realizar una posterior interpolación de los datos, se utilizó el software Qual2kw versión 6, el cual permitió obtener 9 puntos con información para “La Veta”, 11 puntos para la quebrada “San Ramón”, y 13 puntos para la quebrada “San Francisco”. Dicho número de puntos fueron los máximos posibles que se pudieron obtener sin afectar la estabilidad del modelo implementado. El programa de modelación fue calibrado con los datos hidráulicos y de calidad de agua del periodo 2012 – 2015, correspondiente al tiempo considerado para establecer la línea base ambiental del proyecto. Una vez calibrado el modelo para cada uno de los tramos de estudio, se pudo modelar la dinámica de la calidad del agua para el tiempo de construcción, correspondiente al año 2016, y al periodo de inicio de explotación, correspondiente al año 2017, para cada uno de los tramos. Teniendo los resultados de la modelación del software Qual2kw, dichos datos fueron procesados para expresar la calidad del agua mediante los indicadores ICOSUS, ICOMI e ICOMO, definidos para cada uno de los puntos con información en cada una de las fuentes, y posteriormente se realizaron interpolaciones IDW (Inverse Distance Weighted) mediante el software ArcGIS 10.5.1, las cuales permitieron obtener la representación gráfica de los índices de contaminación espacialmente, a lo largo y ancho de las quebradas definidas como objeto de estudio.

PALABRAS CLAVE: *Calidad de agua, Qual2K, ArcGIS, Interpolación, ICOSUS, ICOMI, ICOMO.*

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de los contaminantes en los cuerpos de agua ha generado que en los últimos años se hayan aumentado las investigaciones sobre índices que permitan describir y cuantificar el estado de la calidad del agua, buscando generar mecanismos de control sobre este tema.

Las actividades desarrolladas por el hombre, en particular las actividades mineras que se realizan cerca de cuerpos de agua pueden traer consigo impactos negativos sobre el ambiente y los ecosistemas acuáticos, generando la presencia de contaminantes que terminan en los cuerpos de agua, deteriorando su calidad. La instrumentación de cuencas, el monitoreo de variables medio ambientales junto con el uso de herramientas desarrolladas para la prevención, control y mitigación de impactos negativos, permiten realizar seguimiento a las variables naturales de los ecosistemas acuáticos, en función del tiempo (Quino & Quintanilla, 2013). Es así, como mediante los modelos matemáticos, se puede obtener aproximaciones a dichas variables para conocer parámetros de interés medioambientales en puntos donde no se tiene una medición de estas características ya sean físicas, químicas y/o biológicas.

Para la simulación de la dinámica de los contaminantes en los cuerpos de agua, se han desarrollado múltiples modelos, los cuales cuentan con características específicas a considerar como los tipos de procesos a representar y métodos de solución, tipo de cuerpos de agua, número de dimensiones modeladas, estado de los sistemas representados, tipo de transporte de los contaminantes y características de la cuenca en consideración. Además, para elegir el modelo que mejor se acople a la situación particular que se desea representar, deberán ponerse en consideración aspectos como la disponibilidad de información, el objetivo de la modelación, y los procesos que se desean modelar.

Por las características específicas mencionadas anteriormente, se ha elegido la herramienta de modelación Qual2kw para simular la dinámica de la calidad de las fuentes hídricas en el área objetivo. Dentro de las principales características del modelo Qual2K, se encuentra la realización de una modelación unidimensional (en dirección del flujo de la corriente), así como la modelación de diversos parámetros, dentro de los que se encuentran: conductividad, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, DBO (rápida y lenta), nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, pH, temperatura y algunos parámetros hidráulicos como caudal, velocidad, profundidad y ancho del cauce (Bracho Vargas, Argote, & Díaz Mueque, 2016).

Debido a que el software Qual2k modela 19 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua (Castro Huertas, 2015), se hacía demasiado extenso la presentación de los resultados de la variación de la calidad del agua parámetro por parámetro, es por ello que, para darle un mejor manejo y entendimiento a la información y su posterior presentación, se decidió presentar mediante Indicadores de calidad o contaminación de las Aguas, como lo son el ICA (*Índice de Calidad de Agua*) o ICO (*Índice de Contaminación*) respectivamente, buscando representar eventos y características ya sean positivas o negativas de las fuentes de agua y de ésta manera presentar los resultados de una manera más optimizada (Martínez de Bascaran, 1976).

A lo largo de los años, diferentes autores, han desarrollado una serie de metodologías, para plantear Índices que dentro de su estructura tengan parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua que permitan dar cuenta de la calidad de esta, algunos de estos son: DWQI (EU), CCME-WQI (Canadá), UWQI (Europa), ICAUCA (Colombia). Muchos de ellos, se han planteado de acuerdo de la zona o a las características donde se encuentra el cuerpo de agua, como es el caso del indicador ICAUCA, diseñado para el Río Cauca. (Torres, Hernán, & Patiño, 2009). Consecuentemente, estos indicadores expresan sus resultados cuantitativos sin unidades utilizando escalas cualitativas en función del conocimiento del autor o de los autores, generando análisis en muchos de los casos no aptos para ser utilizados en situaciones o actividades específicas, parte de ello por la pérdida de información que se genera en la conversión del dato. Es por esto por lo que el planteamiento de los ICO, son un complemento al entendimiento de los fenómenos ecológicos, por lo que se decidió representar los cambios en la calidad del agua mediante tres indicadores de contaminación (ICOSUS, ICOMI, ICOMO), los cuales han sido utilizados por la industria petrolera en Colombia por más de seis años con resultados favorables al entendimiento del fenómeno que expresan, además de que se demostró que entre ellos existe una correlación próxima a cero. (Ramirez, Restrepo, & Viña, 1995).

Para la modelación espacial de los datos, se considera que los SIG son herramientas eficientes para el almacenamiento, administración y exposición de datos espaciales, y que específicamente la herramienta de interpolación espacial (Nurhadiyatna, Sunaryani, Sudriani, & Latifah, 2016) permite la estimación de los valores de las propiedades en ubicaciones no muestreadas, según el valor de valores observados en localizaciones conocidas. (Akther & Tharani, 2017) utilizaron la metodología de interpolación IDW de ArcMap en su estudio denominado “Evaluación de la calidad del agua del río Kaduna, Nigeria utilizando el Índice de Calidad del Agua” asumiendo como aplicable el criterio base de IDW, el cual consiste en asumir que mientras más cerca esté el punto muestreado a la celda cuyo valor se va a estimar, más se parecerá el valor de la celda al valor del punto muestreado; o lo que es similar, como lo señala la primera ley de geografía de Waldo Tobler “todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes.

2. MARCO TEÓRICO

Los modelos de calidad de agua son relaciones matemáticas que permiten la cuantificación de los procesos físicos, químicos y biológicos de los compuestos presentes en los cuerpos de agua (Paredes, 2004). Estos modelos se han utilizado en aguas superficiales para evaluar los problemas de degradación ambiental por contaminación. Asimismo, las simulaciones son mecanismos que sirven para establecer planes de gestión y control para conservar la calidad del bien o del recurso. (Bracho Vargas et al., 2016).

La espacialización de los contaminantes en los cuerpos de agua, son de suma importancia para el análisis de las problemáticas referentes al cómo se ve afectada la calidad del agua en diferentes escenarios, sean que estos hayan ocurrido o que se trate de ejercicios predictivos en caso de que llegasen a ocurrir. En el área de la ingeniería y de las ciencias de la tierra, existen distintas técnicas de interpolación matemática que pueden ser utilizadas para generar modelos de fenómenos ambientales a partir de un conjunto de puntos de monitoreo ubicados en distintos lugares del área de estudio. La calidad del resultado depende de muchos factores, uno de los cuales es la propia naturaleza del fenómeno estudiado. Hay sistemas y fenómenos que presentan comportamientos regulares en el espacio y en el tiempo que son más fáciles de estudiar; otros son fenómenos que contienen un componente muy marcado de aleatoriedad por lo que su tratamiento y representación es compleja y requiere de técnicas mucho más avanzadas. (Quino & Quintanilla, 2013)

Los ICA tiene como objetivo la estimación de un determinante ambiental de forma cuantitativa, generalmente entre 0 y 1 ó, 0 y 100, que define el grado de calidad de un cuerpo lóxico continental que eventualmente se convierte en un atributo cualitativo. Con ello se pretenden reconocer, de una forma ágil y fácil, problemas de contaminación, sin tener que recurrir a la observación de cada una de las numerosas variables fisicoquímicas que lo componen. (Martínez de Bascaran, 1976).

Si bien el desarrollo de los ICA ha jugado un papel muy importante en el contexto ecológico y medio ambiental, sus debilidades constituyen un obstáculo importante para su aplicación, ya que al concentrarse en un único número que define la calidad de un cuerpo de agua, se produce una inmensa pérdida de información, lo que genera un análisis enmascarado de la condición real y los cambios que suceden sobre el recurso hídrico. (Montoya, Acosta, & Zuluaga, 2011). Por estas limitaciones, se presentan los indicadores de contaminación (ICO), los cuales complementan y permiten precisar problemas ambientales, así como también, profundizar en la identificación de especies con potencial indicador. (Ramírez et al., 1995)

Con base en lo anterior, se propone trabajar con los siguientes índices de contaminación, los cuales se definen en un rango de 0 a 1: (Ramírez et al., 1995)

- **ICOSUS**: Índice de contaminación por sólidos suspendidos

Determina concentración de sólidos suspendidos, tanto orgánicos como inorgánicos.

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 * \text{sólidos suspendidos (g/m}^3\text{)}$$

Ecuación 1.

- **ICOMI**: Índice de contaminación por mineralización

Se expresa en las variables de: conductividad (sólidos disueltos), dureza (cationes de calcio y magnesio) y alcalinidad (aniones carbonatos y bicarbonatos).

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{\text{Conductividad}} + I_{\text{Dureza}} + I_{\text{Alcalinidad}})$$

Ecuación 2.

Dónde:

$$I_{\text{Conductividad}} = 3.26 + 1.34 * \text{LOG}_{10}(\text{Conductividad}(\mu\text{S/cm}))$$

$$I_{\text{Dureza}} = -9.9 + 4.40 * \text{LOG}_{10}(\text{Dureza}(\text{g/m}^3))$$

$$I_{\text{Alcalinidad}} = -0.25 + 0.005 * \text{Alcalinidad}(\text{g/m}^3)$$

- **ICOMO**: Índice de contaminación por materia orgánica.

Se expresa en las variables de: DBO₅, coliformes totales y saturación de oxígeno.

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{\text{DBO}} + I_{\text{Coliformes Totales}} + I_{\text{Oxígeno \%}})$$

Ecuación 3.

Dónde:

$$I_{\text{DBO}} = -0.05 + 0.70 * \text{LOG}_{10}(\text{DBO}(\text{g/m}^3))$$

$$I_{\text{Coliformes Totales}} = -1.44 + 0.56 * \text{LOG}_{10}(\text{Coliformes Totales}(\text{NMP/cm}^3))$$

$$I_{\text{Oxígeno \%}} = 1 + 0.01 * \text{Oxígeno\%}$$

Dado que estos indicadores se calculan y expresan de forma puntual, al realizar un análisis del indicador a lo largo de un tramo de un cuerpo hídrico o de la totalidad de su longitud, es necesario recurrir a métodos que permitan realizar interpolaciones de éstos y así poder dar cuenta de la afectación que presenta la fuente y en qué lugares a lo largo de su cauce se evidencia un incremento o disminución del potencial daño. Para realizar esto, es necesario recurrir a metodologías de interpolación como IDW o Kriging las cuales se basan en análisis estadísticos para estimar valores de puntos que no tienen información con base en puntos que cuentan con información observada; en este caso, correspondiente a datos de batimetría y de análisis fisicoquímicos de las fuentes. Dichas interpolaciones permiten que, mediante herramientas por el Software ArcGIS, se pueda mostrar el comportamiento de los indicadores de una manera visual lo que da un mayor entendimiento de los fenómenos.

IDW usa una combinación lineal de pesos en puntos conocidos para estimar valores de ubicación desconocidos (ESRI, 2015). Es decir, los valores en ubicaciones desconocidas $Z(S_0)$ (se determinaron por el valor de ponderación $\lambda_i(S_0)$) y los valores en ubicaciones conocidas $Z(S_i)$ expresados matemáticamente como se muestra en la Ecuación:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(S_0) * Z(S_i)$$

Ecuación 4.

Y para solucionar la anterior ecuación, los pesos $\lambda_i(S_0)$: se estimaron a través de la distancia inversa de todos los puntos a los nuevos puntos aplicando la ecuación:

$$\lambda_i = \frac{1}{\beta d(S_0, S_1)} \frac{1}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{\beta d(S_0, S_1)}} ; \beta > 1$$

Ecuación 5.

Donde:

λ_i : Peso para el vecino i (la suma de los pesos debe ser la unidad para garantizar un interpolador imparcial).

$d(S_0, S_1)$: Distancia desde el nuevo punto a un punto de muestra conocido.

β : Coeficiente utilizado para ajustar los pesos.

n : número total de puntos en el análisis de la muestra.

3. METODOLOGÍA

Se propone construir una metodología para determinar las variaciones en los índices de contaminación del agua de las quebradas San Ramón, San Francisco y La Veta, las cuales desembocan al Río Guadalupe, con la intervención del proyecto minero San Ramón de la empresa Red Eagle Mining de Colombia a lo largo de su desarrollo; Línea base (2012-2015), Construcción (2016) y primera etapa de explotación (2017).

3.1 Obtención de información requerida

La información obtenida para el desarrollo del proyecto proviene de la empresa Red Eagle Mining de Colombia y de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), correspondiente a la medición de los perfiles hidráulicos con sus respectivos aforos de los tres cuerpos de agua (periodo 2012-2015), caracterizaciones de parámetros fisicoquímicos en los tres puntos caracterizados para cada fuente hídrica (periodo 2012-2017) y, topografía y cartografía de las quebradas principales, e imágenes satelitales de la zona de estudio.

Ver Anexo 1. Caracterizaciones Red Eagle Mining de Colombia.

3.2 Selección del área de estudio

Se seleccionó como área de influencia una sección de la Cuenca del río Guadalupe, en la cual se encuentran dos microcuencas: San Francisco y San Ramón, debido a que el proyecto genera una presión hídrica sobre 3 quebradas que desembocan en el Río Guadalupe y, que permiten describir el cambio en su comportamiento (fisicoquímico y microbiológico) a lo largo de su cauce hasta confluir en el Río Guadalupe.



Figura 1. Ubicación del proyecto minero Red Eagle Mining de Colombia.

3.3 Planteamiento e identificación de datos de estudio

Se identificaron 11 puntos de monitoreo, en las tres quebradas de influencia, distribuidos así:

- 3 puntos en el Quebrada San Ramón: alta, media y baja.
- 3 puntos en el Quebrada La Veta: alta, media y baja.
- 3 puntos en el Quebrada San Francisco: alta, media y baja.
- 1 punto en el Río Guadalupe antes del vertimiento de las quebradas.
- 1 punto en el Río Guadalupe después del vertimiento de las quebradas.

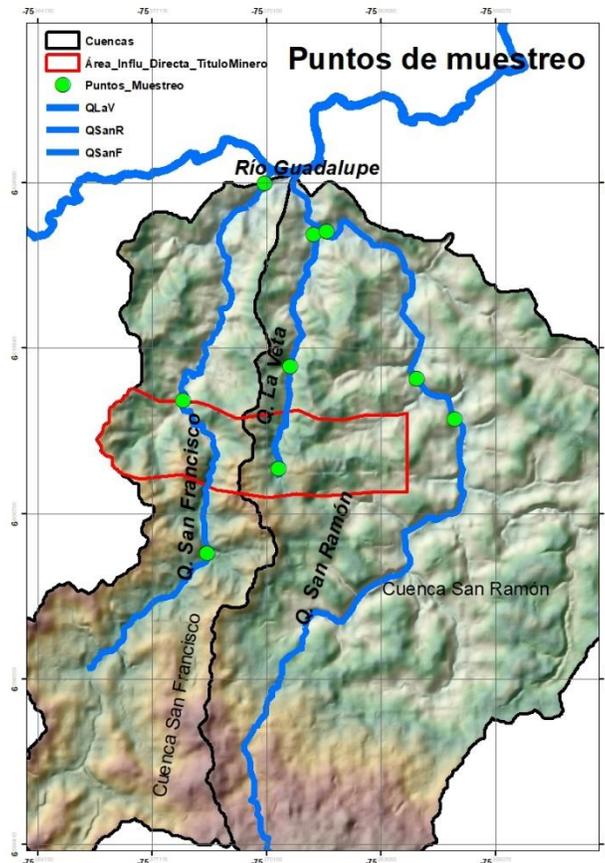


Figura 2. Ubicación de los puntos donde se realizaron caracterizaciones sobre las fuentes por parte de la empresa Red Eagle Mining de Colombia.

3.4 Generación de la GDB

Se creó una geodatabase con la información base necesaria para el desarrollo de los objetivos correspondientes al estudio planteado, como shp de la cuenca, los drenajes, ubicación e infraestructura del proyecto, los puntos de muestreo sobre cada tramo de estudio, las polilíneas de las quebradas San Ramón, San Francisco y La Veta con sus respectivos buffers sobre los que se va a realizar las respectivas interpolaciones, los cuales fueron llevados a formato de polígonos, también se cuenta con una malla de puntos (Feature class:muestreo), los cuales contienen la información de los valores de los ICO y, finalmente, se tienen los raster con los valores interpolados mediante IDW, en cada una de las quebradas modeladas. (Ver Anexo 3. GDB)

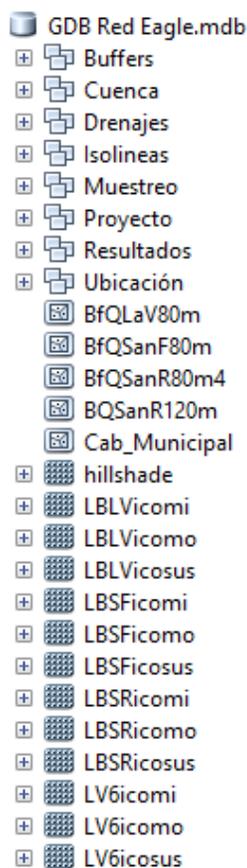


Figura 3. Estructura de la GDB planteada

3.5 Modelación mediante el software Qual2kw – V6

Se utilizó el software Qual2kw con el fin de obtener una aproximación de la dinámica de la calidad en los tramos de interés en los puntos donde no se realizó el monitoreo, para luego ser comparadas con los datos conocidos, obteniendo así información indirecta en zonas con carencia de información (Ver Anexo 2. Modelaciones Qual2Kw). Dicho modelo fue calibrado con base en la información hidráulica y con los parámetros fisicoquímicos del periodo comprendido entre los años 2012 y 2014 para las tres fuentes de referencia, y finalmente permitió conocer unidimensionalmente, información de la calidad del agua en 9 puntos para “La Veta”, 11 puntos para “San Ramón”, y 13 puntos para “San Francisco”.

Con el fin de obtener una aproximación de las variables en los puntos donde no se realizó el monitoreo, para luego ser comparadas con los datos conocidos, obteniendo así información indirecta en zonas con carencia de información.

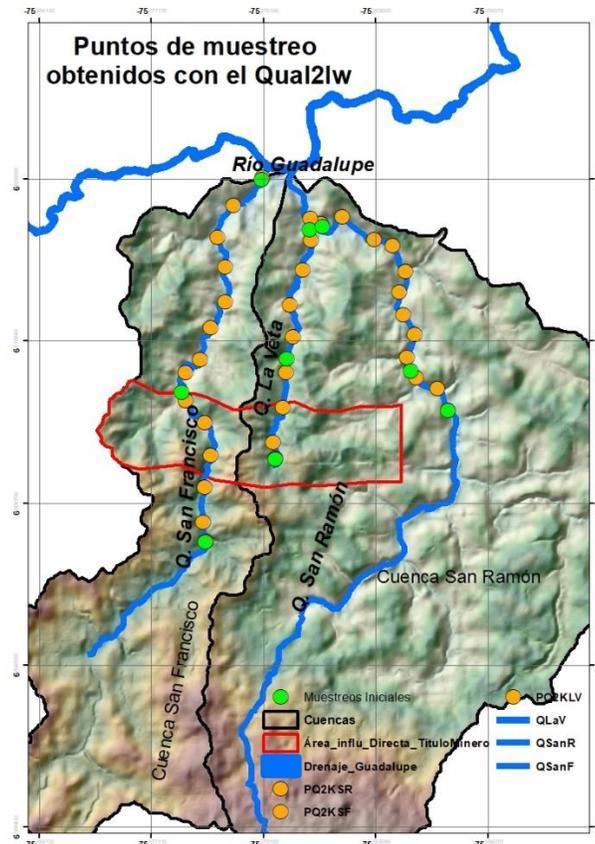


Figura 4. Ubicación de los puntos obtenido mediante la simulación en el Software Qual2Kw.

3.6 Cálculos de los índices de contaminación

Una vez obtenidos los valores de los parámetros fisicoquímicos en todos los puntos arrojados por la modelación Qual2Kw, se hacen las respectivas ponderaciones con los pesos dados por la teoría para cada uno de los parámetros en los diferentes indicadores. Para el cálculo de indicador ICOSUS, es necesario conocer la concentración de los sólidos suspendidos totales en unidades de g/m^3 , para el ICOMI es necesario conocer las concentraciones de Conductividad, Dureza y Alcalinidad; y para calcular el ICOMO es necesario conocer las concentraciones de Oxígeno Disuelto, DBO y Coliformes Totales, los cuales fueron condensados en tablas las cuales se encuentran organizadas por tramo de estudio y el indicador respectivo.

Ver Anexo 4. Resultados

3.7 Interpolaciones mediante el método IDW (Inverse Distance Weighted)

Mediante el software ArcGIS 10.5.1, se realizó un Join entre las tablas que contienen los resultados de los ICO, con el shp de los nuevos puntos de muestreo generados en el Qual2k. Posterior, mediante la herramienta Geostatistical Analyst, se realiza la

interpolación mediante el método IDW (Inverse Distance Weighted) generando un archivo temporal, el cual fue exportado como ráster mediante una máscara, la cual correspondiente a los polígonos buffer generados sobre cada tramo de estudio.

3.8 Representación gráfica de los resultados

Se realizó una reclasificación de los IDW generados para cada tramo en cada periodo de estudio, dentro de un rango de 0 a 1, permitiendo así, obtener valores estimados de los ICO en cualquier punto dentro de los polígonos definidos para las quebradas estudiadas. Estas interpolaciones serán representadas mediante mapas en los tres momentos del proyecto Inicio (2012-2014), Construcción (2016) y actualidad (2017), en una variación de colores entre azul y rojo, en el cual rojo se acerca a uno (1) y azul se acerca a cero (0) y de esta manera poder apreciar el cambio de la dinámica de las tres fuentes hídricas de estudio durante las diferentes etapas del proyecto.

Ver Anexo 5. Mapas

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan gráficamente, los resultados obtenidos de la variación de la calidad del agua en las tres quebradas de estudio durante línea base, construcción y la primera etapa de explotación, de acuerdo con los indicadores de contaminación relacionados con los sólidos suspendidos, mineralización y materia orgánica.

4.1 ICOSUS

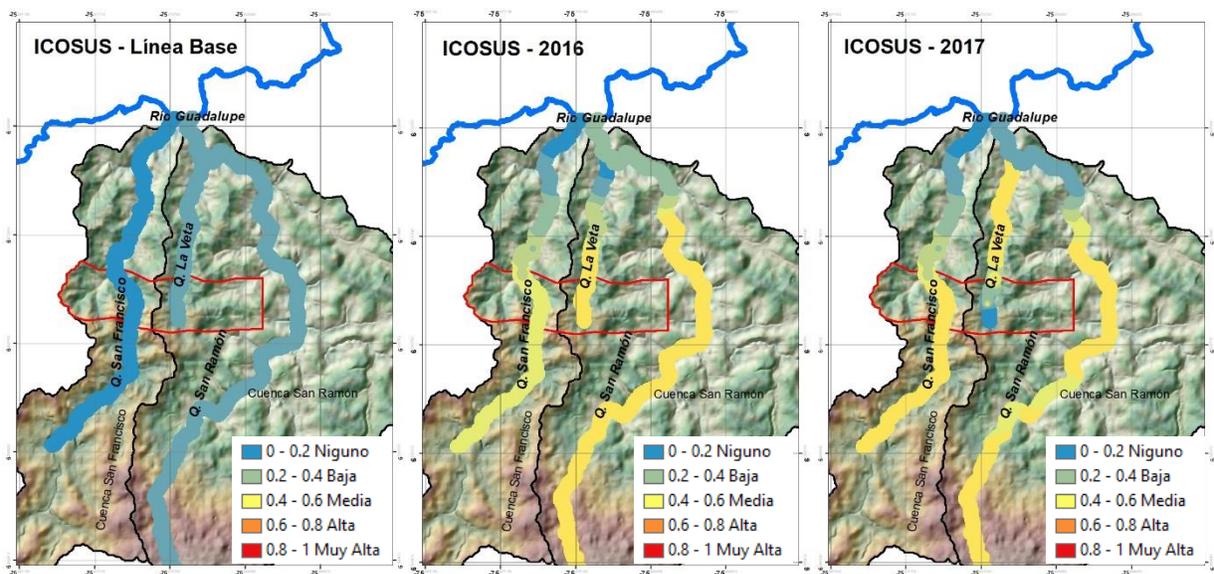


Figura 5. Variación del indicador ICOSUS durante línea base, construcción y la primera etapa de explotación del proyecto minero San Ramón en la quebrada “Caño La Veta la quebrada “San Ramón” y la quebrada “San Francisco”.

El ICOSUS es el indicador que mide la contaminación por sólidos suspendidos totales en el agua. En las gráficas se puede observar la representación de dicho indicador, inicialmente para el periodo 2012-2015, posteriormente para el año 2016 y finalmente para el año 2017.

Para el periodo comprendido por los años entre 2012 y 2015, correspondiente al periodo en el que se levantó la línea base de proyecto minero San Ramón de Red Eagle de Colombia, se evidencia que las fuentes tenían bajas concentraciones de sólidos suspendidos totales, lo cual se refleja en los bajos valores del indicador a nivel general. Cabe mencionar que en la quebrada San Francisco se nota un menor nivel de contaminación por SST. Estos bajos niveles de concentración de sólidos, son indicadores de fuentes posiblemente inalteradas o con muy bajos niveles de contaminación desde su cabecera hasta su parte baja; el contenido de sólidos puede verse asociado a pequeños movimientos de tierra, deslizamientos, actividades económicas a pequeña escala o hasta a la resuspensión de sólidos en resaltos hidráulicos naturales de la fuente.

En el gráfico correspondiente al año 2016, se evidencia el aumento de la contaminación a un nivel medio desde las cabeceras hasta las partes medias de las tres quebradas estudiadas; que, si bien no dan muestra de un impacto grave o irreversible sobre la fuente, si indican que los aportes de sólidos por parte del proyecto aumentan considerablemente, y que la empresa debe encaminar esfuerzos en la implementación de medidas de prevención y mitigación sobre este aspecto.

Para el año 2017, el ICOMI muestra que a nivel general la situación fue muy similar a lo obtenido en el año 2016, pues se tiene contaminación por sólidos desde las partes altas hasta las partes medias de las cuencas y, se evidencia un cambio durante el periodo de explotación en la mina, en el caño denominado “La Veta”, el cual sufrió un mayor impacto por el aporte de sólidos de la actividad propia del proyecto. Lo anterior puede explicarse, ya que si bien, la mina impacta las tres quebradas presentes en el área de influencia, el caño la veta presenta una mayor susceptibilidad a los impactos debido a que pasa directamente por el terreno explotado, y su bajo caudal no le permite asimilar las cargas contaminantes con la velocidad que lo hacen los otros dos cuerpos de agua.

4.2 ICOMI

El índice de contaminación por mineralización ICOMI, permite conocer cuan contaminado se encuentra un cuerpo de agua en parámetros como Conductividad, Dureza y Alcalinidad. Por lo anterior, este indicador será uno de los de mayor análisis en el presente

estudio, ya que es el que presenta mayor susceptibilidad de afectación frente a la actividad específica de la minería.

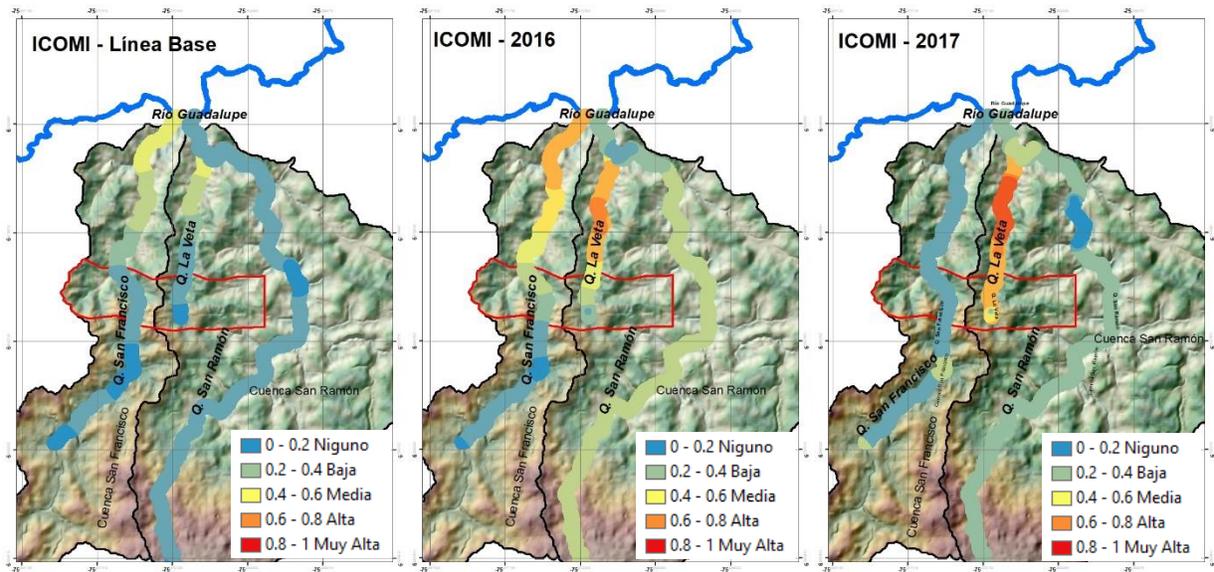


Figura 6. Variación del indicador ICOMI durante línea base, construcción y la primera etapa de explotación del proyecto minero San Ramón en la quebrada “Caño La Veta”, la quebrada “San Ramón” y la quebrada “San Francisco”.

En la gráfica representativa de la condición del ICOMI durante el periodo de línea base (Figura 6), se observa que a nivel general las 3 quebradas se encuentran poco contaminadas, sin embargo, en la parte baja de la quebrada San Francisco y del Caño La Veta, aumenta levemente la presencia de contaminación por mineralización. Dicha afectación puede presentarse como consecuencia de pequeñas intervenciones antrópicas aisladas, o actividades económicas de pequeña escala, que no son lo suficientemente grandes para elevar considerablemente el indicador evaluado.

En el escenario representativo del ICOMI durante el periodo de adecuación y construcción en la mina (Figura 6), es evidente que la zona que presentaba vulnerabilidad desde el periodo de línea base, correspondiente a las partes bajas de las quebradas San Francisco y La Veta, ha sufrido una afectación debido a la actividad en la mina, ya que pasó de tener un indicador de magnitud media – baja, a tener un indicador de magnitud alta en ciertos tramos de las quebradas.

Durante el periodo de explotación (Figura 6) hay dos fenómenos muy marcados en cuanto a cambios de contaminación por mineralización. El primero es la recuperación de las quebradas San Francisco y San Ramón, las cuales presentaban índices de mineralización de medios a altos en el anterior escenario, y en el de 2017, nuevamente cuentan con indicadores bajos de contaminación, y el segundo, es el aumento de los contaminantes que se presentaron o que se pueden seguir presentando sobre la quebrada La Veta, desde

el sitio donde recibe directamente la afectación de la mina, hasta la parte donde confluye con la quebrada San Ramón en el periodo de explotación de la mina.

La afectación por mineralización ha sido el impacto más significativo a lo largo de todo el ciclo del proyecto, entre los indicadores estudiados, lo cual era previsible desde la realización de la modelación sobre la plataforma Qual2Kw o incluso desde la lectura de las caracterizaciones fisicoquímicas provistas por la empresa propietaria del proyecto, ya que los parámetros asociados al ICOMI eran los que presentaban mayores alteraciones. Frente a la afectación más grave observada, que fue la causada sobre la quebrada La Veta, en el año 2017, se puede mencionar que la modelación realizada podría servir como insumo para el mejoramiento de las medidas de manejo ambiental implementadas en la mina, en caso de reactivar su operación, de manera que se pueda llevar a cabo la actividad económica, sin impactar de manera grave los recursos hídricos de la zona.

4.3 ICOMO

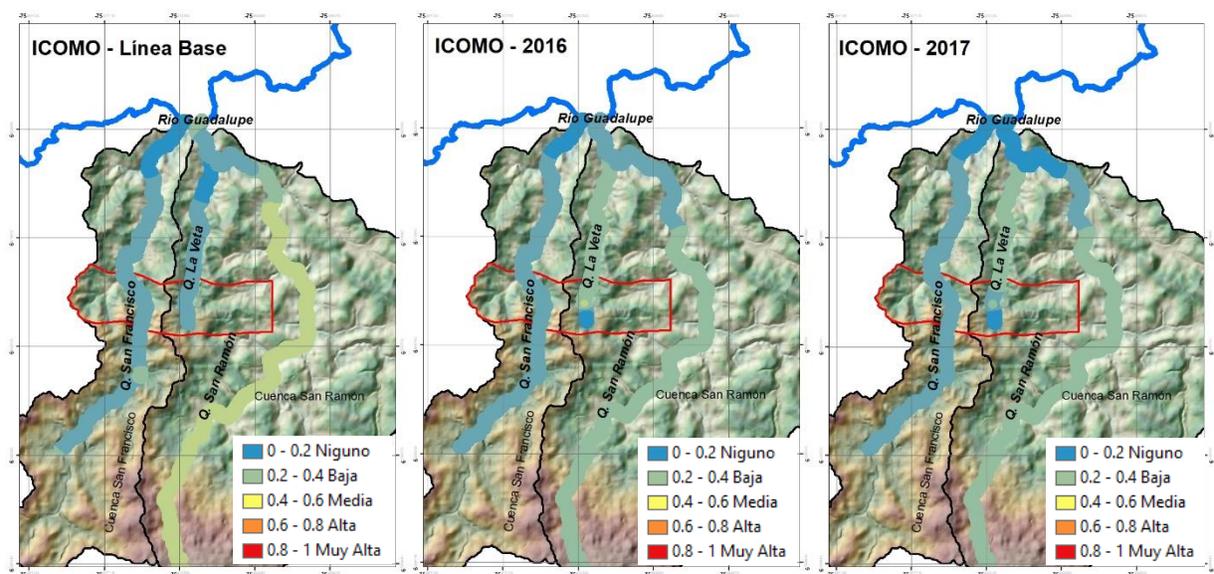


Figura 7. Variación del indicador ICOMO durante línea base, construcción y la primera etapa de explotación del proyecto minero San Ramón en la quebrada “Caño La Veta”, la quebrada “San Ramón” y la quebrada “San Francisco”.

El índice de contaminación por materia orgánica ICOMO, muestra una alta representatividad de lo que ocurrió en la zona del proyecto en cuanto al cambio de usos del suelo. Inicialmente se tiene el gráfico que representa la contaminación por materia orgánica en las tres quebradas presentes en el área de influencia del proyecto, durante el periodo 2012-2014, en el cual se evidencia de manera general la baja contaminación, sin embargo, también es notoria la diferencia a lo largo de toda la quebrada San Ramón, ya que presenta valores entre medios y bajos del índice referenciado. Lo anterior puede explicarse, de acuerdo a información recolectada en la zona, que indica que en el periodo

correspondiente a la línea base del proyecto, se desarrollaba la actividad ganadera de manera masiva a lo largo de toda la cuenca de la quebrada San Ramón, lo cual, sumado a factores como las precipitaciones, la escorrentía, la rugosidad, la deforestación, entre otros, puede llevar grandes cantidades de residuos orgánicos sobre la fuente hídrica, los cuales se ven reflejados en el indicador.

En los gráficos que reflejan la situación de contaminación por materia orgánica en las fuentes hídricas de interés para los años 2016 y 2017, se evidencia el abandono de la actividad ganadera en gran parte de la cuenca de la quebrada San Ramón, ya que disminuyó considerablemente el índice en dicha fuente. La diferencia que se puede notar entre la representación del ICOMO de los años 2016 y 2017, es que para el 2017 la quebrada San Ramón en la parte baja de su cuenca, cuenta con una mayor recuperación en su índice de contaminación frente a lo observado para el año 2016.

En algunos casos, la contaminación por materia orgánica se puede presentar debido a vertimientos de carácter agroindustrial por la presencia de granjas porcícolas pertenecientes a los habitantes de la zona.

5. CONCLUSIONES

- El presente estudio de manera general tuvo como objetivo representar gráficamente, y mediante indicadores, el estado de la calidad del agua durante tres escenarios; el primero durante la línea base del proyecto (2012-2014), el segundo, durante su construcción y adecuación (2016), y el tercero, durante su periodo de operación y explotación (2017).
- La modelación sobre la plataforma Qual2Kw realizó dos aportes importantes para los objetivos del estudio. El primero fue aumentar la cantidad de puntos con información para la posterior realización de la interpolación con IDW, y el segundo fue permitir observar la capacidad asimilativa de las fuentes, frente al aporte de carga contaminante del proyecto minero San Ramón.
- La representación gráfica de las afectaciones a la calidad del agua de las quebradas hace más fácil la comprensión de los fenómenos que se están estudiando, generando una identificación más precisa de los sitios donde se concentra la afectación y de esta manera, poder plantear soluciones para la reducción del impacto.
- Los indicadores de contaminación permiten expresar la información de una manera más completa, ya que describen mejor el estado de un cuerpo de agua, en cuanto a su calidad o estado actual, debido a que perciben las afectaciones por la dinámica

natural del cuerpo de agua y las actividades económicas que se desarrollan alrededor de éstas y son propias de la zona, como la ganadería o, agricultura, comparado con los indicadores de calidad los cuales no son muy susceptibles a los cambios generados en las fuentes, debido a que sus ponderaciones se basan en medir los parámetros físicos químicos en un escenario actual, tomando esa caracterización siempre como la línea base.

- Los métodos de interpolación como el IDW permitió representar de una mejor manera el comportamiento de los contaminantes a lo largo de todo el cauce de las quebradas de interés.

6. REFERENCIAS

- Agudelo Calderón, C. A., García-Ubaque, J. C., Robledo Martínez, R., García-Ubaque, C. A., & Quiroz-Arcenales, L. (2016). Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n1.55384>
- Akther, M. S. R., & Tharani, G. (2017). Assessment of Water Quality Parameters and Determination of Water Quality Index of Tube Well Water in Vengalcheddikulam DS Division, Vavuniya District, Sri Lanka. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, (November), 13. <https://doi.org/ISSN 2307-4531>
- Asghari, F. B., Mohammadi, A. A., Dehghani, M. H., & Yousefi, M. (2018). Data on assessment of groundwater quality with application of ArcGIS in Zanjan, Iran. *Data in Brief*, 18, 375–379. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2018.03.059>
- Bracho Vargas, L., Argote, L. A., & Díaz Mueque, L. (2016). Evaluación del software qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar (Colombia) impactados por actividad minera. *Revista Multiciencias*, 16, 5–13. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90450808002>
- BELTRÁN Vargas, Julio Eduardo; RANGEL-CH, Jesús Orlando (2012). Modelación dinámica de los sólidos suspendidos totales en el humedal jaboque, Bogotá (Colombia). *Colombia Forestal*, vol. 15, No 2, p. 191-205
- BONILLA Viviana (2008). Modelación de patógenos en ríos: Análisis de sensibilidad paramétrica (ríos Bogotá, Tarcoles, Magdalena y Subachoque). Tesis Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. 91 pág.

- Castro Huertas, M. A. (2015). *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA* *APPLICATION OF QUAL2Kw IN MODELING OF GUACAICA'S RIVER WATER QUALITY, DEPARTMENT OF CALDAS, COLOMBIA*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/51032/1/1053781847.2015.pdf>
- CHAPRA, Steve; PELLETIER, Greg (2003). *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and User's Manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Claudia, L., & Matías, B. (n.d.). *Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión*. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- ESRI (2015). *ESRI, (2015). ArcGIS 10.5: Using ArcGIS Spatial Analyst. Software User Guide* ESRI, USA.
- Formica, S. M., Sacchi, G. A., Campodonico, V. A., Pasquini, A. I., & Cioccale, M. A. (2015). *MODELADO DE CALIDAD DE AGUA EN RÍOS DE MONTAÑA CON IMPACTO ANTRÓPICO. CASO DE ESTUDIO: SIERRA CHICA DE CÓRDOBA, ARGENTINA* (Vol. 31). Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v31n4/v31n4a1.pdf>
- García Ubaquea, César, García Vaca, María Camila, Agudelo Rodríguez, C. F. (2014). *Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C.* *Tecnura*, 18(42), 90–102. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v18n42/v18n42a08.pdf>
- González, J. (2012). *DESARROLLO DE UN MODELO GEOESPACIAL PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO. CASO DE ESTUDIO: EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO*.
- KANNEL, Prakash R; et.al (2007). *Application of QUAL2K for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. Environmental monitoring*
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, C., & Sánchez, Á. R. (n.d.). *Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión*. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Ielizaveta, D., Valentyna, P., Valentyn, V., Ekaterina, G., Vladimir, P., Aleksandr, M., ...

- Dmitry, S. (2019). Water quality analysis and simulation. *MATEC Web of Conferences* 265, 06005 (2019) GCCETS 2018, (January). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926506005>
- Leonardo Vera Puerto, I. (2007). *Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo qual2k como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D. C.* Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co:8443/bitstream/handle/10554/3805/VeraPuertolsmaelLeonardo2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mhlongo, S., Mativenga, P. T., & Marnewick, A. (2018). Water quality in a mining and water-stressed region. *Journal of Cleaner Production*, 171, 446–456. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.030>
- Montoya, Y., Acosta, Y., & Zuluaga, E. (2011). RÍO NEGRO Y SUS PRINCIPALES TRIBUTARIOS EMPLEANDO COMO INDICADORES LOS ÍNDICES ICA , EL BMWP / COL Y EL ASPT Water quality assessment in Río Negro River and its main tributaries using ICA , BMWP / Col and ASPT. *Caldasia*, 33(1), 193–210.
- Nurhadiyatna, A., Sunaryani, A., Sudriani, Y., & Latifah, A. L. (2016). 2D Spatial Interpolation for Water Quality Parameter Distribution in Maninjau Lake, (October). <https://doi.org/10.1109/IC3INA.2016.7863052>
- PEÑA Cotrino, Cristina Andrea; QUIJANO Prieto, Diego Mauricio (2012). Modelación de nitrógeno en la cuenca alta del rio Siecha para establecer procesos de transformación de nitrógeno. Universidad de La Salle. Colombia.
- Paredes, J. (2004). *Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos.* UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1895/tesisUPV2190.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quino, I., & Quintanilla, J. (2013). *ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL LAGO POOPÓ-URU URU APLICANDO HERRAMIENTAS SIG.* *Bolivian Journal of Chemistry* (Vol. 30).
- Rakotondrabe, F., Ndam Ngoupayou, J. R., Mfonka, Z., Rasolomanana, E. H., Nyangono Abolo, A. J., & Ako Ako, A. (2018). Water quality assessment in the Bétaré-Oya gold mining area (East-Cameroon): Multivariate Statistical Analysis approach. *Science of The Total Environment*, 610–611, 831–844.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.08.080>

Ramirez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1995). CUATRO ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE AGUAS CONTINENTALES. FORMULACIONES Y APLICACIÓN. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135–153. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009

Red Eagle Mining. Estudio de Impacto Ambiental.

Rivera, J. (2011). EVALUACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL RÍO FRÍO SOPORTADA EN EL QUAL2K Versión 2.07. *DYNA*, 78, 131–139. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/23532/1/20489-91560-1-PB.pdf>

Software Qual2Kw – V6 - A Modeling framework for simulating river and stream water quality

Torres, P., Hernán, C., & Patiño, P. (2009). ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA EN FUENTES SUPERFICIALES UTILIZADAS EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. UNA REVISIÓN CRÍTICA. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15s1/v8n15s1a09.pdf>

Villada-Arias, I. C. (2014). APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA DE UN DEPÓSITO DE MATERIAL CALCÁREO APPLICATION GEOSTATISTICAL METHODS FOR QUALITY CHEMICAL CHARACTERIZATION OF A DEPOSIT CALCAREOUS MATERIAL, 35, 15–24. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n35/n35a02.pdf>

Yang, Y., Guo, T., & Jiao, W. (2018). Destruction processes of mining on water environment in the mining area combining isotopic and hydrochemical tracer. *Environmental Pollution*, 237, 356–365. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2018.02.002>