

## Evaluación de la calidad y propuesta de tratamiento del agua proveniente de la mina “Dos Carlos” en Pachuca, Hidalgo

Vega Loyola Miriam, Villaseca Eddy Abraham Alonso, Contreras Contreras Ricardo

Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.  
Av. Miguel Bernard s/n, Edificio de Posgrado e Investigación 2do. Piso,  
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”. Colonia Lindavista Zacatenco, México, CP 07738.

miriq\_vl@yahoo.com.mx, rcontreras@ipn.mx

Fecha de aceptación: 10 de agosto de 2015

Fecha de publicación: 23 de septiembre de 2015

### RESUMEN

El manejo de los recursos hídricos constituye una parte vital e integral en las operaciones mineras debido al potencial de contaminación de agua y su efecto consecuente en la salud humana y el medio ambiente. Por ser el agua un elemento indispensable para la vida e imprescindible como herramienta de trabajo, es importante el cuidado de abastecimiento de agua limpia y potable, y los métodos a emplear para el tratamiento de ésta con el propósito de que pueda ser reutilizada para el abastecimiento de la población cercana a la mina, este tratamiento contempla una serie de procesos, los cuales se consideran en el diseño de la planta potabilizadora; se presentarán las características y dimensiones de dichos equipos, para obtener la calidad requerida del efluente (NOM-127-SSA1-1994). Algunos de los equipos que se diseñarán son: filtros, desarenadores, osmosis inversa, etc. La finalidad de esta investigación es proporcionar una solución para el agua proveniente de minas, a través de un tren de tratamiento.

**Palabras clave:** tratamiento, potabilización, diseño, abastecimiento.

### ABSTRACT

The management of water resources is a vital and integral part in mining operations due to potential water pollution and its consequent impact on human health and the environment. As the water indispensable for life and indispensable element as a working tool, it is important to take care supply clean drinking water, and the methods to be used to treat this with the purpose that can be reused to supply of the population near the mine, this treatment includes a series of processes and equipment which are considered in the design of the treatment plant, where the characteristics and dimensions of the equipment shall be submitted, using a number of factors, such as flow rate, composition, concentration, required or expected effluent quality (NOM-127-SSA1-1994), etc. Some of the teams that were designed are: filters, grit chambers, reverse osmosis, etc. The purpose of this research is to provide a solution for water from mines, through a treatment train.

**Key words:** treatment, purification, design, procurement.

## 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, la actividad minera, como la mayor parte de las actividades que el hombre realiza para su subsistencia, crea alteraciones en el medio natural, desde las más imperceptibles hasta las que representan claros impactos sobre el medio en que se desarrollan, de cualquier manera, también debe quedar claro que el hombre necesita los recursos mineros hoy, y los necesitará en el futuro. Por otro lado algunas de estas minas se encuentran cercanas a la red hidráulica de comunidades o poblaciones que enfrentan problemas cotidianos de escasez de agua lo cual sería de gran utilidad para su potabilización y aprovechamiento. Una de las minas más grandes y productivas de esta ciudad fue “Dos Carlos”, que se encuentra en el municipio de Pachuca. Su agua de evacuación se consideraría un flujo muy importante para la satisfacción del vital líquido en las zonas conurbadas donde se localiza esa mina.

México es uno de los países de Latinoamérica que se encuentra localizado en una región volcánica rica en minerales. La tradición minera en el país se remonta a la época prehispánica, con la explotación de yacimientos ubicados principalmente en las zonas de Taxco, Pachuca, Guanajuato y Querétaro. Dicha actividad adquirió una gran relevancia económica y social hasta el periodo de la colonia, convirtiéndose entonces en el motor del crecimiento económico y modernización de la Corona española. La minería suministró insumos a la industria de la construcción, metalurgia, siderurgia y química por más de tres siglos, ayudando a generar infraestructura y polos de desarrollo en el país. A nivel mundial, el auge de la minería mexicana se tradujo en un importante flujo de metales preciosos, especialmente plata, hacia los circuitos comerciales europeos. Actualmente, la posición de la minería dentro de las industrias de sector primario es significativa aun cuando enfrenta problemas de mercados deprimidos. (Cardenas, 2002)

Los residuos provenientes de actividades de minería pueden ser clasificados como sólidos y líquidos. Los principales residuos sólidos con potencial contaminante de los acuíferos provienen de las minas de carbón y de metales. En el primer caso, el residuo rocoso son jales y areniscas ricas en pirita ( $\text{FeS}_2$ ). El intemperismo de estas rocas causa la oxidación de los sulfuros, y la movilización del hierro y manganeso; lo que produce un lixiviado rico en sulfatos, hierro y sólidos suspendidos, y de bajo pH. Las minas de metales producen residuos sólidos ricos en calcita y cuarzo, que, aunque son menos solubles que los anteriores, también pueden producir lixiviados similares. (Morrall, 1992). La remediación de acuíferos son las técnicas orientadas a recuperar la calidad del agua subterránea que ha sufrido procesos de contaminación química, orgánica o microbiológica, tal como se muestra en la figura No.1.



**Figura1.** Agua procedente de mina.

Actualmente estas técnicas pueden clasificarse en técnicas on-situ y técnicas in-situ, la primera involucra la extracción del agua subterránea contaminada, su tratamiento en superficie, mediante plantas de tratamiento de agua. Fueron las primeras técnicas para eliminar los contaminantes

presentes; sin embargo los grandes volúmenes de agua a tratar explican los altos costos en que se incurre con esta formulación. No obstante, existen procedimientos conocidos y controlables, de relativo fácil acceso e implementación que permiten separar los contenidos minerales de aguas de pozos de mina para su potabilización y uso doméstico. (Figueruelo, 2004).

Los procesos de potabilización están en función de la calidad del agua en las fuentes de captación, pudiendo ser tan sencillo como la desinfección, o involucrar diversas operaciones unitarias como oxidación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, además de la desinfección. En algunos casos, se llega a requerir intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción con carbón activado. Tradicionalmente, los proyectos de plantas potabilizadoras, elaborados por empresas especializadas, presentaban variaciones y en algunos casos, una tendencia al sobreequipamiento y la automatización, así como a la inclusión de “obras de arte” en las estructuras de alimentación y recolección, lo que encarece y hace más lenta la construcción de las plantas. (Conagua, 2010). El tren de potabilización básico comprende floculación, sedimentación, filtración y desinfección; se incluye la dosificación y alimentación de los reactivos (sulfato de aluminio y polielectrolito como coagulantes) y gas cloro en la desinfección. Con éste sistema se puede remover fundamentalmente la turbiedad, contaminación bacteriológica y disminución en los niveles de otros parámetros.

## OBJETIVO

Evaluar la calidad del agua subterránea proveniente de la mina “Dos Carlos” y proponer un tren de potabilización, con el fin de abastecer a las comunidades cercanas que padecen de desabasto.

## Problemática

A unos 100 kilómetros al Noroeste de la Ciudad de México, en el actual estado de Hidalgo, se localizan los centros mineros de Pachuca, Real del Monte y Mineral del Chico. Desde la época de su descubrimiento, México se ha significado por la importancia de su minería. La explotación de sus criaderos es anterior a la Conquista, pues ya los nativos extraían y beneficiaban metales; es a partir de la llegada de los españoles, y propiamente en el segundo cuarto del siglo XVI, cuando tienen su origen nuestra industria minera. Muchas han sido las minas, distritos o zonas que por el volumen de su producción ocupan un sitio destacado en la historia de la minería y que han contribuido a la producción minero metalúrgica del país con metales argentíferos.

Desde hace siglos se descubrieron algunos de los minerales de la porción occidental de México, en la división geográfica conocida como Sierra Madre occidental, y a lo largo de la costa, entre el océano y esa cadena de montañas, la distribución de la riqueza minera de México, desde el punto de vista geográfico, guarda ligas muy estrechas con la geología propia de sus provincias metalogenéticas. En los últimos años las actividades mineras han experimentado un desarrollo muy notorio, y ello ha traído consigo en muchos casos que se haya visto seriamente afectada la calidad de las aguas del entorno. Ahora bien, los procesos de explotación minera implican un amplio campo de actividades, que tienen lugar en condiciones hidrogeológicas muy diversas, por ello resulta difícil concretar, de manera simple, las actividades contaminantes de la minería en las aguas subterráneas, y en muchos casos particulares pueden quedar excluidos de un análisis somero.

Cuando se realiza una explotación minera implica de alguna manera una alteración del sistema hidrológico natural. En el caso de que la explotación se extienda bajo el nivel piezométrico de un acuífero libre, o intercepte a un acuífero confinado, deberá bombearse el agua subterránea mientras dure la explotación. Por lo tanto, durante este tiempo la mina, desde un punto de vista hidrodinámico, actuará como un sumidero en el sistema acuífero, hacia el que fluye el agua subterránea, debido al descenso piezométrico provocado. Por otra parte la crisis de abastecimiento que ha sufrido en los últimos años la cabecera municipal de Pachuca y zonas conurbadas, ha propiciado que se tenga un

déficit en la demanda de agua potable, a tal grado que el servicio es tandeado para poder abastecer de manera insuficiente a la población que se encuentra asentada en la zona de hospitales.

## METODOLOGÍA

El primer paso en el diseño de plantas de tratamiento es la selección y ubicación de los pozos de extracción, además del caudal requerido.

### Localización

Pachuca, ciudad capital del estado de Hidalgo, le corresponden coordenadas de latitud norte  $20^{\circ}07'21''$ , de longitud oeste  $98^{\circ}44'09''$ , con una altura de 2400 a 2800 msnm. La ciudad de Pachuca de Soto colinda al Norte con Mineral del Chico y con Mineral del Monte, al Sur con Zempoala y Zapotlán de Juárez, al Este con Mineral de la Reforma y Epazoyucan, y al Oeste con San Agustín Tlaxiaca. Figura No.2



Figura 2. Ubicación del sitio

### Extensión

Este municipio cuenta con una superficie total de  $195.30 \text{ km}^2$ , representando el 0.93% de participación relativa con respecto al total de la superficie del estado.

### Orografía

Pachuca tiene un rasgo muy particular y es que gran parte del centro de la ciudad está rodeada de cerros, cubiertos de casas habitación, características de los pueblos mineros colonizados por Ingleses. Se ubica en la provincia del eje neovolcánico, formado por llanuras en la mitad de su territorio, con lomeríos en un 25%; y de sierra el porcentaje restante. Entre los cerros que más destacan son el cerro del Cuixi, siendo una pequeña elevación que se encuentra al noreste de la ciudad, y el cerro de San Cristóbal teniendo al sureste el cerro de Cubitos.

### Clima

El clima en Pachuca es templado semi-frío y con lluvias en verano, su precipitación pluvial es de 400 a 800 mm anual. Los vientos son dominantes durante 8 o 9 meses del año, de ahí el sobrenombre de la "Bella Airosa", y por lo general vienen del noroeste, teniendo una velocidad extrema de 60 a 65 Km/h. Su temperatura promedio anual es de  $24^{\circ}\text{C}$ .

El veloz crecimiento urbano que ha sufrido la ciudad de Pachuca en los últimos 20 años, ha llegado a cubrir los pastizales y el poco bosque existente en la región.

Para la evaluación del agua procedente de la mina “Dos Carlos”, se realizaron cinco muestreos, dos en la época de lluvias (noviembre 2014) y tres en el estiaje (marzo 2015), se tomaron muestras puntuales. La toma y preservación de las muestras se realizaron conforme a las normas: NMX-AA-003-2006 y NMX-AA-014-1980. Los parámetros de campo se determinaron de acuerdo a las normas mexicanas correspondientes: pH (NMX-AA-008-SCFI-2000), conductividad eléctrica (NMX-AA-093-SCFI-2000) y turbiedad (NMX-AA-038-SCFI-2000). Los parámetros restantes se realizaron conforme a la norma NOM-127-SSA1-1994. Para la determinación de los sólidos totales y sólidos volátiles totales (NMX-AA-034-SCFI-2001), se colocó la muestra en una cápsula que previamente fue puesta a peso constante; posteriormente se llevó a la estufa a 105°C, hasta sequedad. Para los sólidos volátiles totales, la muestra fue puesta en la cápsula y colocada en la mufla a 550°C, durante 15 min, a continuación se llevó a la estufa a 105°C, durante 20 min, por último se dejó en el desecador hasta temperatura ambiente y se pesó.

Los metales pesados: Hierro (Fe), Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn); se analizaron por medio de espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Thermo Scientific, Mod 3300, las determinaciones se realizaron por flama de acuerdo a la NMX-051-SEMARNAT-2001. Se realizó la digestión de 100 ml de muestra en medio ácido (5 ml de HNO<sub>3</sub>), se colocaron en una parrilla evitando que hiervan las muestras, dejando evaporar casi a sequedad, posteriormente se añadió 10 ml de ácido clorhídrico (HCl, 1:1) y 15 ml de agua, se dejó calentar por otros 15 min hasta digestión completa, se aforó a 50 ml y se realizó el análisis. Antes de la medición de las concentraciones de los metales pesados, se realizaron las curvas de calibración para cada elemento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los contaminantes suelen incorporarse a los medios acuáticos como consecuencia de actividades como la minería, como se observa en los resultados promedio obtenidos (Tabla 1).

De acuerdo a los resultados anteriores, se muestra que parámetros como: turbiedad, sulfatos, manganeso y plomo entre otros, se encuentran fuera de los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994; en función de esta caracterización, la propuesta es la siguiente: la neutralización de aguas ácidas también produce la precipitación de metales, una vez que estos son usualmente solubles a pH bajo. En este caso, los metales se precipitan en forma de hidróxidos, que forman un material coloidal que tiende a permanecer en suspensión; posteriormente se va a separar los hidróxidos de la fase líquida, lo que se logra con la adición de floculantes. Además de la cal hidratada se puede neutralizar con la cal viva (CaO), sosa cáustica (NaOH) o el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>); estos dos últimos tienen costo importante, mientras que la cal viva requiere más cuidados en la manipulación. Un método que puede reducir los costos de la neutralización es conducir los efluentes a través de un canal revestido de piedra calcárea. El manganeso es un metal abundante en la corteza terrestre y para removerlo se puede emplear la oxidación seguida de la coagulación-floculación, se colocará un sistema con coagulación para sólidos suspendidos y su posterior eliminación del influente. La coagulación se ocupará principalmente para la remoción de turbiedad, el coagulante (cloruro de hierro, FeCl<sub>3</sub>) se dosificará en el agua cruda. En esta etapa se sugiere tener mezcladores para mejorar la mezcla del coagulante con el agua y remover la arena que pudiera estar presente en el agua cruda. El principio operativo de estos equipos radica en el hecho de que la alimentación entra al equipo en forma tangencial, la cual favorece el aumento de la turbulencia incrementando la sedimentación de las partículas contenidas en el seno del líquido, lo que hace que la separación se realice por medio de la fuerza centrífuga. (ODIS, 2005).

**Tabla 1. Resultados de la mina “Dos Carlos”**

| Parámetro                 | Unidades                   | Promedio de Resultados<br>Mina<br>“Dos Carlos” | Límite Máximo<br>Permisible<br>NOM-127-SSA1-1994 |
|---------------------------|----------------------------|--|--|
| pH                        | U de pH                    | 7.20   | 6.5 – 8.5  |
| Conductividad Eléctrica   | □siem                      | 745.00   |  |
| Nitrógeno Amoniacal       | mg/l                       | N.D.   | 0.5  |
| Oxígeno Disuelto          | mg/l                       | 0.1989   |  |
| Sólidos Totales           | mg/l                       | 574.00   | 1000.00  |
| Sólidos Volátiles Totales | mg/l                       | 848.00   |  |
| Turbiedad                 | UTN                        | 7.50   | 5  |
| Color                     | U. Pt-Co                   | 10.00  | 20   |
| Dureza Total              | mg de CaCO <sub>3</sub> /l | 415.50   | 500.00   |
| Dureza de Calcio          | mg/l                       | 353.30   |  |
| Dureza de Magnesio        | mg/l                       | 62.10  |  |
| Cloruros Totales          | mg/l                       | 53.60  | 250.00   |
| Sulfatos                  | mg/l                       | 952.10   | 400.00   |
| Fluoruros Totales         | mg/l                       | 0.5275   | 1.50   |
| Nitratos                  | mg/l                       | 0.1298   | 10.0   |
| Alcalinidad Total         | mg de CaCO <sub>3</sub> /l | 67.60  |  |
| Coliformes Totales        | UFC/100 ml                 | N.D.   | Ausencia o No<br>detectables                     |
| Fierro                    | mg/l                       | 0.0450   | 0.30   |
| Manganeso                 | mg/l                       | 0.3795   | 0.15   |
| Cadmio                    | mg/l                       | N.D.   | 0.005  |
| Calcio                    | mg/l                       | 333.25   |  |
| Magnesio                  | mg/l                       | 3.10   |  |
| Plomo                     | mg/l                       | 0.17   | 0.01   |
| Zinc                      | mg/l                       | N.D.   | 5.00   |

Posteriormente pasará a una etapa de filtración que servirá para remover materia coloidal, suspendida y partículas inorgánicas del agua, como los sulfatos y restos de manganeso que no fueron eliminados en la primera etapa. Se utilizarán filtros compuestos con medio filtrante de diferentes granulometrías de medios múltiples.

Se recomienda un pretratamiento para prevenir incrustaciones sobre las membranas de osmosis inversa (OI), en donde se deberá dosificar una solución antincrustante, la adición de ésta es crucial para la operación exitosa de la osmosis inversa. La falta de dosificación de antincrustante puede causar daños irreversibles en las membranas provocando el reemplazo total de éstas. En la etapa de ósmosis inversa se eliminarán todas las sales por medio de membranas semipermeables. El agua libre de sales se le denomina permeado, la cual es apta para uso doméstico.

Finalmente, las concentraciones de plomo están sujetas a la dinámica de los metales, ya que una vez presente en el suelo son poco móviles y tiende a acumularse en la parte superficial. El plomo se considera un veneno fuerte y bioacumulativo. El tratamiento propuesto es la precipitación del metal, que se realiza a pH entre 9.2 y 9.5, la eficiencia para la formación de precipitados decrece rápidamente a valores extremos de pH. Los reactivos empleados son la cal o los hidróxidos, las cenizas de sosa y

los fosfatos. El tratamiento con cal produce un lodo de buena sedimentación mientras que con sosa cáustica se requiere filtración. El tren de tratamiento propuesto para potabilizar el agua se observa en la figura 3.

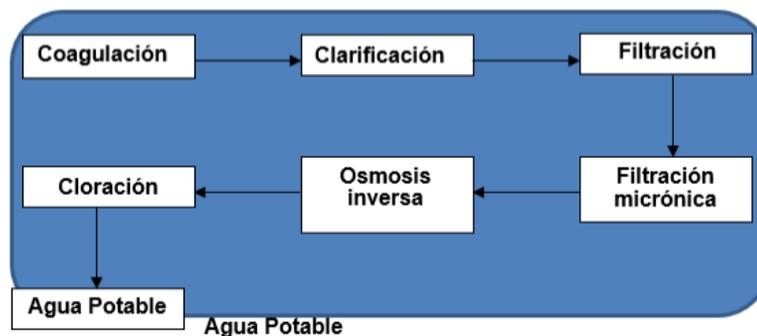


Figura 3. Tren de tratamiento propuesto para potabilización

## CONCLUSIÓN

Los resultados de laboratorio permitieron caracterizar el agua subterránea procedente de la mina “Dos Carlos”, conocer su calidad y con base en éstos, proponer el tren de tratamiento de potabilización, el cual va a eliminar en su mayoría los sólidos disueltos, así como las sales presentes e incluso, metales pesados como el plomo. Se realizarán los cálculos para el diseño de equipos, como: sedimentador, filtro y coagulación-floculación. Posteriormente, como parte de esta investigación se llevarán a cabo pruebas piloto de algunos equipos, para conocer la eficiencia de remoción de las sustancias contaminantes. El objetivo principal del presente trabajo se ha cumplido satisfactoriamente que es aportar la propuesta de un tren de tratamiento para potabilizar el agua proveniente de la mina “Dos Carlos” para dar solución a la población que se localiza cerca de la mina y que sufre de desabasto de agua potable.

## RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones se tiene lo siguiente:

Implementar la planta para potabilizar el caudal y cubrir las necesidades de los habitantes que sufren de escasez, cumpliendo con ello un derecho humano.

Analizar la calidad del efluente periódicamente para monitorear los parámetros que están fuera de los LMP; con el propósito de mantener un inventario actualizado que permita tomar decisiones y acciones en caso necesario.

Mantener informada a la población del origen del agua y la necesidad de adicionar hipoclorito de sodio en caso de que sea necesario para proteger su salud.

## REFERENCIAS

Figueruelo J.E. (2004). Química Física del ambiente y de los procesos medioambientales. España: Reverté, 2004, 591 pp.

Jairo A. Romero. (1999). *Potabilización del Agua*. (3a Ed.). México: Alfaomega

Stanley E.M. (2007). “Introducción a la Química Ambiental”. México: Reverté-UNAM, 725 pp.

---

Consejo de Recursos Minerales (COREMI). (1992). Monografía geológico-minera del Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales. Pachuca, Hgo. México.

ODIS ASVERSA (2005) "Manual de operación para planta potabilizadora de agua", 60 pp.

Comarca minera-Gobierno del estado de Hidalgo. Disponible en: <http://www.Hidalgo.gob.mx/?p=1420> [Rev. 15 de mayo, 2015].

Panorama minero del estado de Hidalgo (PDF). [Rev. 8 de mayo, 2015]. Disponible en: <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf>

CONAGUA (2007) "Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada (PDF). [Rev. 17 de junio, 2015]. Disponible en: [www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)