

# ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES ACUOSOS GENERADOS POR UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Hugo Calderón<sup>1</sup>, Ronald Márquez<sup>2</sup>, Leonardo Rennola<sup>2</sup>

Autor para correspondencia: Leonardo Rennola, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. e-mail: leonardo@ula.edu.ve

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Química, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Manuscrito recibido 20 de octubre de 2017      Aprobado tras revisión 15 de noviembre de 2017

## RESUMEN

Las industrias de producción de cemento por vía seca en Ecuador son fuentes de contaminación ambiental, y particularmente, las aguas residuales producidas no son tratadas previamente antes de su disposición en cuerpos acuosos. En este trabajo se realizó un estudio de las tecnologías de sistemas de tratamiento de aguas residuales para la industria de cemento. Las fuentes de contaminantes, composición y flujos fueron tomadas de una planta real de cemento en Ecuador. Con base en esta información y en el balance de materia de efluentes líquidos, se determinó que los contaminantes que predominan en las aguas residuales generadas son los sólidos suspendidos, los sólidos disueltos, grasas y aceites; y las variables más importantes pH, alcalinidad y las altas temperaturas del proceso. De acuerdo a estas propiedades y en el estudio de las tecnologías para su remoción, fueron seleccionadas diferentes alternativas de procesos para tratar las aguas residuales generadas y para cumplir con las regulaciones ambientales TULSMA (Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente del Ecuador). Los balances de materia con las tecnologías seleccionadas se aplicaron a distintos esquemas de tratamiento con tecnologías simples y la combinación de ellas, las cuales proveen diferentes eficiencias. Se realizaron los análisis de costos para cada esquema de tratamiento, encontrándose que todas las tecnologías son aplicables, siempre que el agua sea tratada hasta el proceso de sedimentación. Sin embargo, el tratamiento de agua residual mediante electrodiálisis, ósmosis inversa o vaporización no es factible por sus altos costos de inversión y mantenimiento.

**Palabras Claves:** Producción de cemento, contaminantes, tratamiento de aguas residuales.

## ABSTRACT

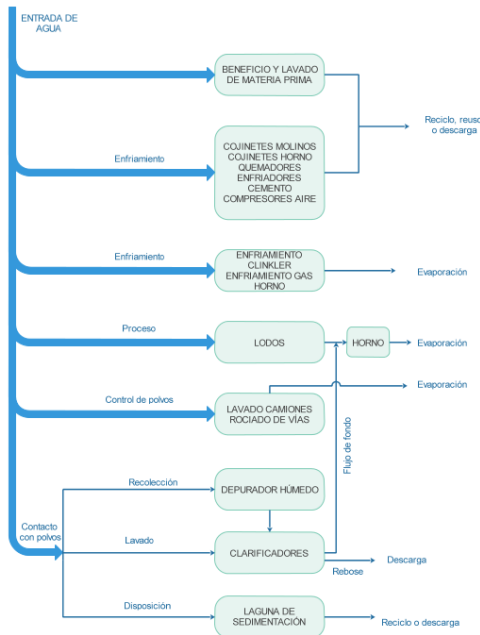
Dry cement production industries in Ecuador are sources of environmental contamination, and in particular, the wastewater produced is not previously treated before being disposed of in water bodies. In this work, a study of wastewater treatment systems technologies for the cement industry was carried out. Sources of contaminants, composition and flows were taken from a real cement plant in Ecuador. Based on this information and on the liquid effluent matter balance, it was determined that the pollutants that predominate in the

wastewater generated are suspended solids, dissolved solids, fats and oils; and the most important variables are pH, alkalinity and the high temperatures of the process. According to these properties and in the study of the technologies for their removal, different process alternatives were selected to treat the wastewater generated and to comply with environmental regulations TULSMA (Unified Text Secondary Legislation, Environment of Ecuador). The material balances with the selected technologies were applied to different treatment schemes with simple technologies and the combination of them, which provide different efficiencies. Cost analyzes were performed for each treatment scheme, finding that all technologies are applicable, as long as the water was treated until the sedimentation process. However, the treatment of residual water by electro dialysis, reverse osmosis or vaporization is not feasible due to its high investment and maintenance costs.

**Key words:** Cement production, contaminants, wastewater treatment.

## INTRODUCCIÓN

La fabricación de cementos origina desechos líquidos con elevada cantidad de sólidos (polvo de clínker), elevada alcalinidad y posibilidad de fraguado (Kohlhaas, 1983) (Deolalkar, 2009) (Ranade y Bhandari, 2014). En las plantas de proceso húmedos y secos, toda el agua residual puede ser reutilizada luego de la aplicación de diferentes tecnologías de depuración, excepto en ciertas operaciones en que están en contacto con polvos, como ocurre con los sistemas húmedos de control de emisiones de partículas (Duda, 1977) (Cembureau, 1999) (Señas et al., 2003).



**Figura 1**

*Diagrama del uso del agua en la industria cementera (U.S. Environmental Protection Agency, 1974).*

El uso de aguas de desecho para alimentar el horno no es posible en los procesos en seco. Por lo tanto, la reutilización completa de efluentes líquidos es factible si se emplean torres y lagunas de enfriamiento (Conway y Ross, 1980). La única descarga que se presenta, en pequeño volumen, es la corriente de escape de la torre de enfriamiento o del drenaje del agua y es la que se requiere para prevenir la acumulación de sólidos disueltos en el agua de recirculación. En algunos casos, este pequeño volumen se puede evaporar. Los sólidos particulados se encuentran en grandes cantidades en el ambiente, por esta razón, las corrientes de enfriamiento se pueden segregar y prevenir que el polvo entre en los sistemas de enfriamiento de agua. En la Figura 1 se muestra el diagrama del uso de agua en industrias cementeras presentándose los efluentes que se generan.

Los parámetros principales de contaminación que se analizan en los efluentes en plantas de fabricación de cemento son pH, alcalinidad, aceites y grasas, sólidos suspendidos y sólidos disueltos totales, principalmente potasio, bicarbonatos y sulfatos (Freeda, Arunkumar y Sivakumar, 2005) (Sharma, Jain y Singhal, 2013). Inicialmente se puede incluir una etapa de igualación de flujo y carga (IFC, 2007). Luego, el tratamiento se efectúa por neutralización y carbonatación. Cabe indicar que las operaciones unitarias de separación, evaporación, precipitación, intercambio iónico, ósmosis inversa y electrodiálisis, individualmente o en combinación, pueden ser completamente efectivos para la eliminación de los sólidos disueltos (Ahmed, Kumar y Gajalakshmi, 2008) (Nkwonta y Ochieng, 2010) (Saleha, El Enanyb y Elzaharc, 2014) (Tiwari, Pradhan y Nandy, 2016) (Hedayatipour, Jaafarzadeh y Ahmadmoazzam, 2017).

Entre los separadores *en procesos de tratamiento de agua* se encuentran:

### Separadores de grasas y aceites

Los separadores API son utilizados para remover aceite de los efluentes, generalmente si las gotas de aceite son lo suficientemente grandes o no se encuentran emulsionadas. Las unidades de flotación por gas usan aire/gas para hacer flotar el aceite rápidamente del seno del agua de producción.

En los separadores de placas, las corrugadas se empaican de tal forma de mejorar el desempeño de los tanques de separación por gravedad. Las gotas de aceite coalescen y forman gotas más grandes al recorrer un camino más largo hasta el tope del tanque, provocado por las placas corrugadas. Este diseño permite reducir el tamaño de los separadores API.

Los hidrociclones generan movimientos de rotación del fluido que crea fuerza centrífuga que empuja el agua (más pesada) hacia la periferia y el aceite (más liviano) al sector central de los conos. El agua continua su recorrido hacia abajo y sale por el fondo. La mejora del efecto de la gravedad provee una tasa más alta de separación.

La filtración con lechos puede lograrse utilizando diferentes tipos de medios filtrantes: arena, cáscaras de nueces, antracita y otros. Esta tecnología es ampliamente usada en aguas de producción. La filtración no remueve los iones disueltos y su desempeño no se ve afectado por concentraciones altas de sales. La eficiencia de remoción puede mejorarse usando coagulantes (Peavy *et al.*, 1985).

### Separadores de sólidos suspendidos y disueltos

La función principal de la coagulación química es la desestabilización y agregación de coloides. En el tratamiento de aguas la coagulación tiene como función la formación de flóculos que adsorben o atrapan materia suspendida y especialmente materia suspendida coloidal. La coagulación se lleva comúnmente a cabo por las siguientes sustancias: Sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ), Sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), Sulfato férrico ( $Fe(SO_4)_3$ ), Cloruro férrico ( $FeCl_3$ ) o mezclas de ellos. Adicionalmente se pueden utilizar polímeros.

Los procesos de *sedimentación* y *clarificación* tienen como objetivo separar partículas suspendidas en el agua por la acción de su peso. Dichas partículas pueden existir en el agua, pueden ser producto de la adición de agentes químicos (coagulación, remoción de hierro) o el resultado de una floculación física combinada con un tratamiento biológico.

Los métodos que producen *agua por evaporación* (o destilación) se caracterizan por producir agua con una cantidad de sólidos totales muy baja (< a 25 ppm, incluso se llega a menos de 2 ppm), y por ende, reducen significativamente el nivel de cloruros y otros iones (Sivakumar, *et al.*, 2015).

El *intercambio iónico* se puede efectuar en dos o más etapas generalmente, los cationes se remueven primero y luego los aniones. En éste, los iones hidronio e hidroxilo, se combinan en cantidades iguales para formar agua sin dejar residuo y sin afectar el pH (Peavy *et al.*, 1985) (Sasan *et al.*, 2017) (Ang *et al.*, 2017).

Otro método para separar los sólidos disueltos es el que se efectúa con el uso de *membranas micro porosas* finas. Hay dos formas de operación: un sistema usa presión para conducir el agua a través de la membrana contra la presión osmótica y se llama ósmosis inversa; donde, la presión aplicada es mayor que la presión osmótica natural (Setiawan, Shi y Wang, 2014). Mientras que, la *electrodialísis*, usa fuerza eléctrica para conducir los iones a través de una membrana selectiva de iones (Arar *et al.*, 2014).

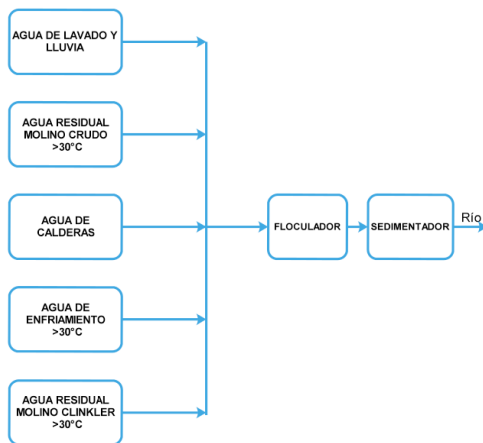
## Esquemas de Tratamiento de las Aguas Residuales en Plantas de Cemento

A continuación, se presentan algunos esquemas de tratamiento de aguas residuales sugeridos por la literatura (U.S. Environmental Protection Agency, 1974):

- a) *Disposición de efluentes con sedimentador y floculadores:* en este, el agua que se toma del río es tratada con sedimentadores y floculadores, ésta es usada como agua de enfriamiento. Una parte se evapora en el enfriamiento de los gases del horno y el clínker. El agua residual es drenada en un sedimentador y de allí se descarga al río como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2**

Diagrama de flujo de aguas residuales provenientes de un proceso de producción de cemento. Tratamiento con floculador y sedimentador (U.S. Environmental Protection Agency, 1974).



- b) *Disposición de efluentes con carbonatación y lagunas de sedimentación:* en la Figura 3 se muestra un esquema de tratamiento en el que para recuperar el polvo de los precipitadores electrostáticos, éste se lleva a un tanque agitado y es tratado con los gases de chimenea para carbonatar el polvo en cuatro absorbedores en serie, reduciendo el pH de 12 a 8. El lodo es llevado a un sistema de dos lagunas (una en operación y otra en limpieza). El precipitado formado por la carbonatación se sedimenta en la laguna y se bombea el agua superficial de vuelta, como contribución al agua de enfriamiento.

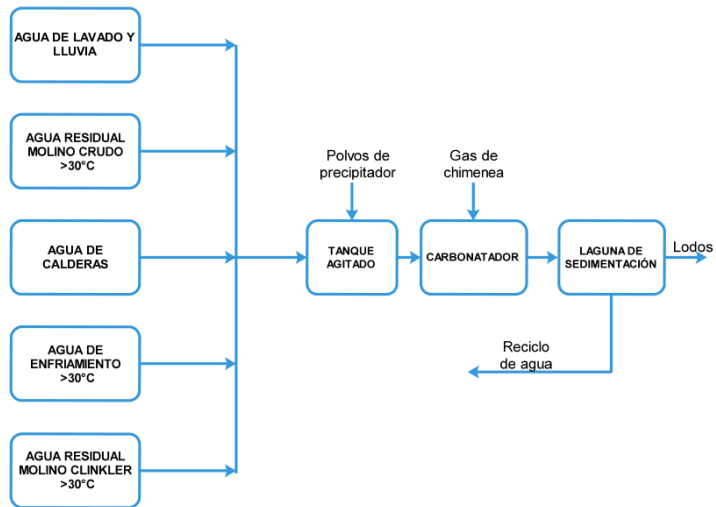


Figura 3

Diagrama de flujo de aguas residuales provenientes de un proceso de producción de cemento. Tratamiento con floculador y sedimentador (U.S. Environmental Protection Agency, 1974).

Las operaciones que conforman estos procesos simples pueden variar de acuerdo a la composición y tipo de efluentes en plantas de producción de cemento (Marceau, Nisbet y Van Geem, 2006).

Existen diversas investigaciones que han estudiado las características de procesos de tratamiento de aguas residuales para plantas de concreto (Sealey, Phillips y Hill, 2001) (De Paula, De Oliveira y Andrade, 2014), mientras que, en plantas de producción de cemento es escasa la información al respecto. En Ecuador existen varias plantas de producción de cemento, las cuales, no utilizan procesos de tratamiento de aguas residuales (Fierro, 2016). Esto conlleva a que efluentes con un contenido de contaminantes mayor al permitido en la Normativa del Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente del Ecuador - TULSMA (Ministerio Del Ambiente República del Ecuador, 2002) sean descargados a cuerpos acuáticos sin ser tratados. Por esta razón, es importante el estudio de las posibles tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas en plantas de producción de cemento y su aplicación.

En el presente trabajo se realiza el estudio de las diferentes tecnologías para el tratamiento de los efluentes acuosos generados por una Industria Cementera. Para ello se definieron las tecnologías para el tratamiento de los contaminantes en procesos en seco, la realización de balances de materia de agua y la comparación de la composición de los efluentes con los límites

máximos permitidos en la normativa del Ecuador. Con estos resultados se presentan las posibles tecnologías de tratamiento de efluentes que se pueden utilizar de acuerdo al nivel de tratamiento y de acuerdo a la estimación de costos para su implementación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología consistió en realizar balances de materia de los efluentes acuosos y aguas residuales con datos obtenidos de análisis de una planta de cemento de Ecuador. En la Tabla 1 se presentan datos promedio de parámetros de aguas residuales de fábricas de cemento de Ecuador y los límites máximos de acuerdo a la normativa de este país.

Parámetro	Unidades	Promedios	Límite TULSMA
pH		8,8	
Conductividad	μS/cm	594,8	
Temperatura	°C	< 30	
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	343,0	
Oxígeno disuelto	mg/L O <sub>2</sub>	4,8	
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	177,3	200
DBO5	mg/L O <sub>2</sub>	56,5	100
Nitratos	mg/L NO <sub>3</sub>	0,3	44
Nitritos	mg/L NO <sub>2</sub>	0,2	0
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub>	59,4	1000
Sólidos totales	mg/L	1986,8	1600
Sólidos sedim.	mg/L	3,8	130
Grasas y aceites	mg/L	348,8	30
Caudal	l/s	40,9	

**Tabla 1**

*Resultados promedios de la caracterización físico-química de aguas residuales de una fábrica de cemento de Ecuador (Calderón, 2014).*

La temperatura de descarga de los efluentes no se registra en la Normativa del TULSMA (Ministerio del Ambiente República del Ecuador, 2002), sin embargo, al medir a la descarga del proceso su temperatura es inferior a los 30 °C, lo cual no va a afectar significativamente la calidad del agua al ser descargada al río.

**Balances de Materia:** Los balances de materia consistieron en calcular la salida de contaminantes en la corriente de efluentes líquidos de una planta de producción de cemento. Para ello, se utilizaron las eficiencias de separación de los procesos individuales o en conjunto para determinar posteriormente si la cantidad de estos contaminantes se encuentra por encima o por debajo de la normativa ambiental ecuatoriana, y por lo tanto, establecer si el proceso es adecuado o no para realizar el tratamiento.

**Estimación de costos.** Se llevó a cabo la estimación de los costos de los procesos seleccionados, utilizando el programa CapdetWorks (Hydromantis, 2017). El programa permite realizar un diseño preliminar y luego calcular el costo del proyecto (Hydromantis, 2001). Los costos fueron ajustados a Julio de 2016. Los costos de la planta se evaluaron partiendo de los costos de los equipos principales y luego se le adicionan costos de instalación, costos de las tuberías, costos de control y automatización, costos de componentes eléctricos, costos de diseño de ingeniería, costos administrativos y legales, costos de inspección, contingencias y sobrecostos (Gavaskar y Cumming, 2001).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Esquemas de Tratamiento de Contaminantes Líquidos de la Industria de Cemento y Balance de Materia

En la Tabla 2 se muestran las diferentes tecnologías para el tratamiento de los contaminantes encontrados en los efluentes líquidos de una industria de cemento. Se mencionan los tratamientos para eliminar las grasas y los aceites, y también aquellos que sirven para la separación de los sólidos suspendidos y disueltos (Wang, 2004).

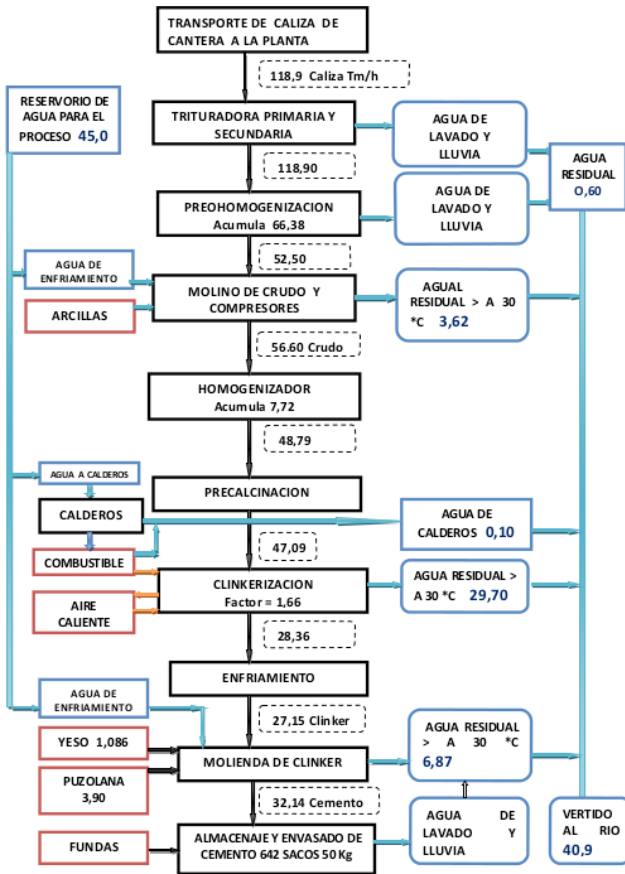
PRIMARIAS	Eficiencia	Capacidad de tratamiento	Costo
Evitar el contacto del agua de lluvia con la materia prima	Alta	Alta	Bajo
Uso procesos en seco para el control de partículas en las corrientes gaseosas	Alta	Alta	Alto
SECUNDARIAS			
Separador API	Media	Media	Bajo
Flotación	Alta	Alto	Alto
Hidrociclones	Media	Alto	Alto
Coagulación	Alta	Alto	Alto
Sedimentadores o clarificadores	Media	Alto	Medio
Torres de carbonatación y lagunas de lixiviación	Alta	Alta	Alto
Electrodialísis	Alta	Media	Muy alto
Ósmosis Inversa	Alta	Alta	Muy alto

**Tabla 2**

*Control de la Contaminación de agua en plantas de Producción de Cemento.*

**Balance de materia**

En la Figura 4 se presenta la cuantificación de las aguas residuales provenientes de una planta de fabricación de cemento del Ecuador, siendo esta de 40,9 L/s. La proporción mayor del caudal son las aguas de enfriamiento con 29,7 L/s y el resto de las aguas provienen de la salida de los molinos de crudo y clinker, incluyendo las aguas de las calderas (Marceau *et al.*, 2006) (Calderón, 2014). El tratamiento de estas aguas residuales se realiza utilizando combinaciones adecuadas de las tecnologías mencionadas en la Tabla 2, que disminuyan los valores de los parámetros que estén por encima de las normas ambientales ecuatorianas.



**Figura 4**  
Cuantificación de las aguas residuales de una industria de cemento.

Se considera que las aguas residuales se combinan para su posterior tratamiento. La composición promedio de los parámetros críticos con las exigencias ambientales en Ecuador, se muestran en la Tabla 3.



**Tabla 3**

Valores de los parámetros críticos de las aguas residuales

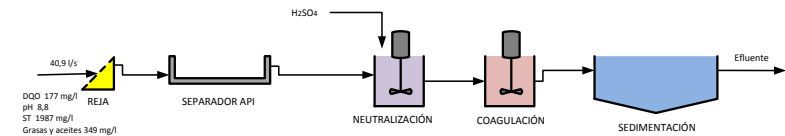
Párametro	Valor	Límite máximo TULSMA
pH	8,8	8
DQO	177 mg/L	200
Sólidos totales	1989 mg/L	1600
Grasas y aceites	349 mg/L	30

### Esquemas de tratamiento

El análisis del tratamiento de las aguas residuales de una planta de producción de cemento del Ecuador se realiza tomando combinaciones adecuadas de las tecnologías mencionadas, que puedan reducir los contaminantes que estén fuera de las normativas ambientales. Los esquemas de tratamiento propuestos se presentan a continuación:

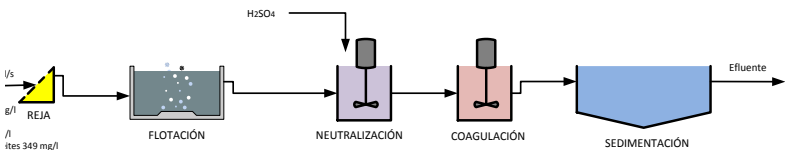
**Esquema de tratamiento 1ETA:** En la Figura 5 se muestra el primer esquema de tratamiento (1ETA). El separador API tiene la función de disminuir la cantidad de aceites y grasas. La neutralización tiene como función llevar el pH a un valor neutro usando ácido sulfúrico. La coagulación servirá para aumentar el tamaño de las partículas y la sedimentación permitirá el asentamiento de las partículas para lograr un agua con características adecuadas para ser descargadas en un curso natural de agua o la posibilidad de ser reusada o reciclada.

**Figura 5**  
Esquema de tratamiento 1ETA para las aguas residuales.



**Esquema de tratamiento 2ETA:** En la Figura 6 se muestra el segundo esquema de tratamiento (2ETA). La diferencia con el primero (1ETA) consiste en que se utiliza flotación para la separación de las grasas y aceites. La flotación es más eficiente y logra valores más bajos de aceites.

**Figura 6**  
Esquema de tratamiento 2ETA para las aguas residuales.



**Esquema de tratamiento 3ETA:** En la Figura 7 se muestra el tercer esquema de tratamiento (3ETA). En este caso se sustituye la neutralización con ácido en el 1ETA, por el uso de la corriente de gas de chimenea de la misma planta de cemento. Este esquema posee la ventaja de minimizar la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

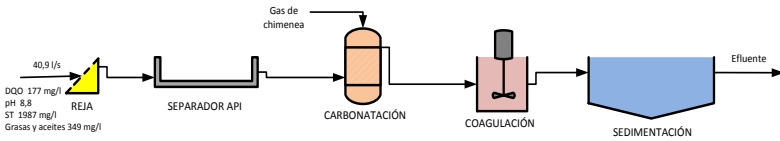


Figura 7

Esquema de tratamiento 3ETA para las aguas residuales.

**Esquema de tratamiento 4ETA:** En la Figura 8 se presenta el cuarto esquema de tratamiento (4ETA). En este caso se sustituye la neutralización con ácido en el 2ETA, por el uso de la corriente de gas de chimenea de la misma planta de cemento. Este esquema posee la ventaja de minimizar la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

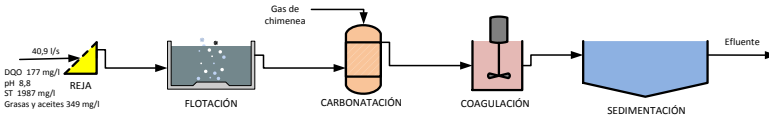


Figura 8

Esquema de tratamiento 4ETA para las aguas residuales.

El tratamiento final de coagulación-floculación-sedimentación de los cuatro esquemas anteriores reduce los sólidos disueltos a niveles aceptables. Si el efluente final se considera reciclar, reusar o eliminarla completamente, deben utilizarse otros tratamientos. La ósmosis inversa y la electrodialísis pueden lograr niveles de calidad de agua excelentes. La evaporación, aunque su consumo energético es alto, tiene la ventaja que podría recuperar material a ser reciclado en la producción de cemento. Los tres tratamientos mencionados anteriormente son excluyentes, es decir sólo se requiere uno de ellos para cumplir con la separación de los sólidos (Peavy, *et al.*, 1985) (Sharma *et al.*, 2013).

Cuando se consideran los tratamientos con ósmosis inversa y electrodialísis, se genera una corriente indeseable que es el concentrado. Dicha corriente debe ser dispuesta de forma adecuada o reusada en la planta de cemento. En el caso de la evaporación, el vapor producido podría reutilizarse.

**Esquema de tratamiento 1ETAOS, 1ETAED y 1ETAEV:** En aras de diferenciar los esquemas de tratamiento para su posterior estimación de costos, se incluyen al esquema 1ETA: i) ósmosis inversa, el cual se denominará 1ETAOS, ii) electrodialísis, designado como 1ETAED y iii) evaporación o 1ETAEV. Estos se muestran en la Figura 9.

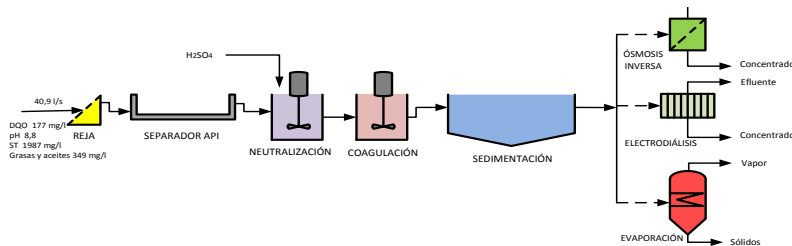
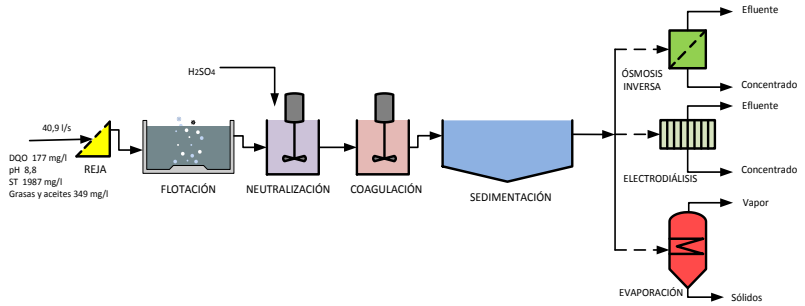


Figura 9

Esquema de tratamiento 4ETA para las aguas residuales.

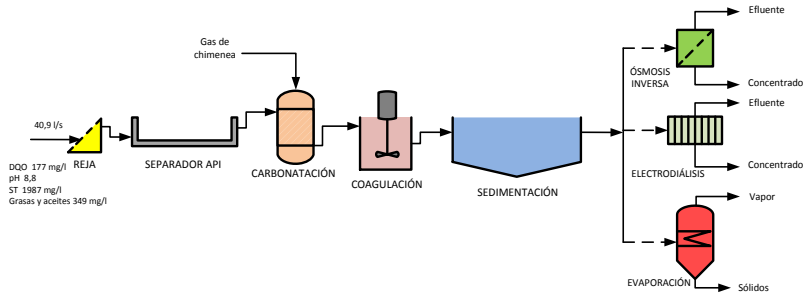
**Esquema de tratamiento 2ETAOS, 2ETAED y 2ETAEV:** En la Figura 10 se muestran los tratamientos adicionales para remover los sólidos disueltos al esquema 2ETA. Con ósmosis inversa 2ETAOS, electrodiálisis 2ETAED y evaporación 2ETAEV.

**Figura 10**  
Esquema de tratamiento 2ETA mas eliminación sólidos disueltos.

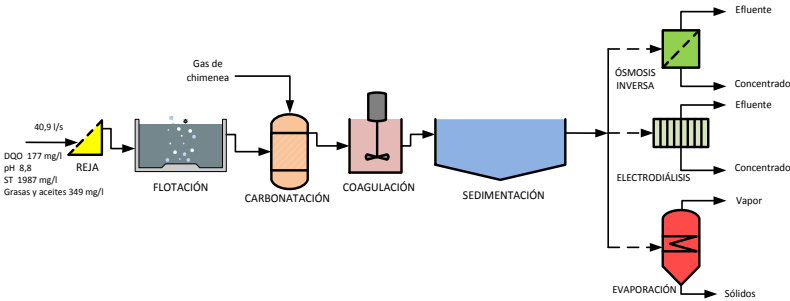


**Esquema de tratamiento 3ETAOS, 3ETAED y 3ETAEV:** En la Figura 11 se presentan los tratamientos adicionales para remover los sólidos disueltos al esquema 3ETA. Con ósmosis inversa 3ETAOS, electrodiálisis 3ETAED y evaporación 3ETAEV.

**Figura 11**  
Esquema de tratamiento 3ETA mas eliminación sólidos disueltos.



**Esquema de tratamiento 4ETAOS, 4ETAED y 4ETAEV:** En la Figura 12 se muestran los tratamientos adicionales para remover los sólidos disueltos al esquema 4ETA. Con ósmosis inversa 4ETAOS, electrodiálisis 4ETAED y evaporación 4ETAEV.



**Figura 12.** Esquema de tratamiento 4ETA mas eliminación sólidos disueltos.

Finalmente, en la Tabla 4 se muestra la estimación de costos de los esquemas de tratamiento de las aguas residuales de los casos presentados para una industria cementera en Ecuador.

Esquema de tratamiento	Costo del proyecto USD
1ETA	5.920.000
2ETA	6.070.000
3ETA	7.360.000
4ETA	7.510.000
1ETAOS	9.450.000
1ETAED	11.200.000
1ETAEV	8.100.000
2ETAOS	9.610.000
2ETAED	11.300.000
2ETAEV	8.250.000
3ETAOS	12.600.000
3ETAED	12.600.000
3ETAEV	11.400.000
4ETAOS	11.000.000
4ETAED	12.700.000
4ETAEV	9.700.000

**Tabla 4** Esquema de tratamiento 4ETA mas eliminación sólidos disueltos.

Los costos de los esquemas de tratamiento de las aguas residuales indican que el proceso 4ETAED, que posee tratamientos adicionales para remover los sólidos disueltos del agua residual, es el de valor más alto de USD 12.700.000. Mientras que el 1ETA, el cual presenta un agua con

características adecuadas para ser descargadas en un curso natural de agua o la posibilidad de ser reusada o reciclada, posee un valor más bajo de 5.920.000 dólares. Así pues, mientras las leyes ecuatorianas no exijan límites muy bajos en los sólidos disueltos o se desee reutilizar el agua para fines de calidad excelente, se debería seleccionar el esquema 1ETA.

Aunque el tratamiento del agua posterior mediante electrodiálisis, ósmosis inversa o vaporización no es factible por sus altos costos de inversión y mantenimiento, es importante señalar, que las restricciones ambientales serán cada vez más estrictas. Las tecnologías que hoy en día son costosas pueden ser necesarias en el futuro (Ranade y Bhandari, 2014). Adicionalmente, históricamente se ha demostrado que las tecnologías de tratamiento (membranas) disminuyen sus desembolsos de inversión una vez recuperados los costos de investigación y desarrollo. En el caso del ósmosis inversa, los materiales utilizados en las membranas cada vez son más económicos (Zacerkowny, 2007).

## CONCLUSIONES

Se pueden encontrar diversas alternativas tecnológicas para el tratamiento de los contaminantes presentes en efluentes líquidos en la fabricación de cemento en procesos secos en el Ecuador, entre ellas: separación de grasas y aceites, utilizando separadores API, separadores por flotación, separadores de placas, hidrociclones y filtración con lechos; la separación de sólidos suspendidos y disueltos, usando operaciones de coagulación, sedimentación, evaporación, ósmosis inversa, electrodiálisis e intercambio iónico. También se pueden utilizar sistemas más sencillos que incluyan sedimentación, coagulación y carbonatación con gas de chimenea. La eliminación de los sólidos disueltos mediante electrodiálisis, ósmosis inversa o evaporación no es factible por los altos costos de inversión y mantenimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, C., Kumar, P. y Gajalakshmi, G. (2008). Total dissolved solids removal by electrochemical ion exchange (EIX) process, *Electrochimica Acta*, 54, 474–483.
- Ang, W.L., Nordin, D., Mohammad, A.W. Benamor, A. y Hilal, N. (2017). Effect of membrane performance including fouling on cost optimization in brackish water desalination process, *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 401-413.
- Arar, Ö., Yüksel, Ü., Kabay, N. y Yüksel, M. (2014). Various applications of electrodeionization (EDI) method for water treatment-A short review, *June*, 342.
- Calderón, H. (2014). Datos de contaminantes gaseosos y acuosos en la planta de cemento, Cemento Chimborazo C.A. Ecuador.
- Cembureau (1997). Best Available Techniques for the Cement Industry. The European Cement Association. Brussels.
- Conway, R. y Ross, R. (1980). Handbook of industrial waste disposal. New York: Van Nostrand Reinhold. 1-24.
- Deolalkar, S. (2009). Handbook for designing cement plants. EEUU: CRC Press.
- U.S. Environmental Protection Agency (1974). Development Document for Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Cement Manufacturing. Point Source Category

- De Paula, H., De Oliveira Ilha, M., y Andrade, L. (2014). Concrete plant wastewater treatment process by coagulation combining aluminum sulfate and Moringa oleifera powder. *Journal of cleaner production*, 76, 125-130.
- Duda, W. H. (1977). *Manual tecnológico del Cemento*. Barcelona: Reverte.
- Freedra, D., k. Arunkumar, K. y Sivakumar, S.R. (2005) Physico-chemical analysis of waste water from cement units, *Journal of Industrial Pollution Control*, 21 (2), 371 – 374.
- Fierro, José A. (2016). Estudio de impacto ambiental complementario y plan de manejo ambiental de la unión cementera nacional planta Chimborazo. Recuperado de <http://www.cementochimborazo.com/Archivos/EslA%20Complementario%20UCEM%20Planta%20Chimborazo.pdf>
- Gavaskar, A., Cumming, L. (2001). Cost Evaluation Strategies for Technologies Tested Under the Environmental Technology. Verification Program. EPA/600/R-99/100.
- Hedayatipour, M., Jaafarzadeh, N. y Ahmadmoazzam, M. (2017). Removal optimization of heavy metals from effluent of sludge dewatering process in oil and gas well drilling by nanofiltration, *Journal of Environmental Management* 203 (Pt 1), 151-156.
- Hydromantis, Inc. (2017). CapdetWorks (Versión 3.0-Gratuita) [Software] Recuperado de <http://www.hydromantis.com/CapdetWorks.html>
- Hydromantis, Inc. (2001). Wastewater Design and Costing at your fingertips... Software for the preliminary design and costing of wastewater treatment systems. Recuperado de [http://www.hydrosoft.co.kr/download.php?bo\\_table=tech&idx=204&file=1](http://www.hydrosoft.co.kr/download.php?bo_table=tech&idx=204&file=1)
- International Finance Corporation (IFC), (2007). World Bank Group, Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing. Recuperado de <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f74848804951d04eb75cb719583b6d16/Final+-+Cement+and+Lime+Manufacturing.pdf?MOD=AJPERES>
- Kohlhaas B. (1983). *Cement Engineers' Handbook*. Alemania: Bauverlag.
- Marceau, M., Nisbet, M. y Van Geem, M. (2006). Life cycle inventory of portland cement manufacture (No. PCA R&D Serial No. 2095b). Skokie, IL, EEUU: Portland Cement Association.
- Ministerio Del Ambiente República del Ecuador (2002). Texto unificado de la legislación ambiental secundaria. Legislación Codificada. Corporación de Estudios y Publicaciones. Recuperado de <http://taolex.fao.org/docs/pdf/ecu112182.pdf>
- Nkwonta, O. y Ochieng, G. (2010). Total Dissolved Solids Removal in Wastewater Using Roughing Filters, *Chemical Sciences Journal*, 2010: CSJ-6
- Peavy, H., Donald. E. Rowe y Tchobanoglous (1985). Water quality: Definition, Charecteristics, and Perspectives, Chapter 2 in *Environmental Engineering*. EEUU: McGraw Hill.
- Ranade, V. y Bhandari, V. (2014). *Industrial wastewater treatment, recycling and reuse*. UK: Butterworth-Heinemann.
- Saleha, M., El Enanyb, G., Elzaharc, M. y Elshikhipy, M. (2014). Use of Alum for Removal of Total dissolved Solids and Total Iron in High Rate Activated Sludge System, *International Journal of Environmental Engineering Science and Technology Research*, 2 (3), 1 – 12.

- Sasan, K., Brady, P., Krumhansl, J. y Nenoff, T. (2017). Removal of dissolved silica from industrial waters using inorganic ion exchangers, *Journal of Water Process Engineering*, 17,117-123.
- Sealey, B., Phillips, P. y Hill, G. (2001). Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 32(3), 321-331.
- Señas, L., Maiza, P., Marfil, S. y Valea, J. (2003). Impacto ambiental producido por morteros cementicios con polvos de acería. *Ciencia e Ingeniería*, 24 (3), 47-53.
- Setiawan, L., Shi, L. y Wang, R. (2014). Dual layer composite nanofiltration hollow fiber membranes for low-pressure water softening, *Polymer*, 55 (6), 1367-1374.
- Sharma, K., Jain, U. y Singhal, A. (2013). Treatment of waste generated from cement industry and their treatment-a review. Recuperado de <http://dl.lib.mrt.ac.lk/handle/123/8889>
- Sivakumar, M., Ramezaniapour, M. y O'Halloran, G. (2015). Brackish water treatment and reuse using vacuum membrane distillation system, *Water Science & Technology Water Supply*, 15 (2), 362-369.
- Tiwari, O., Pradhan M. y Nandy, T. (2016). Treatment of mining-influenced water at Malanjkhanda copper mine, *Desalination and water treatment* 57(52),1-10.
- Wang, L. (2004). Handbook of environmental engineering. EEUU: Humana Press.
- Zacerkowny, O. (2007), Membrane technology's 25 year evolution, *Filtration & Separation*, 44(9), 32-34.