

Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos

Eduardo Soto Regalado, Tomás Lozano Ramírez,
Juan Manuel Barbarín Castillo, Mónica Alcalá Rodríguez
Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas, UANL
Teléfono: (81) 83 29 40 10, extensión 6280, fax extensión 6282
edsoto1962@yahoo.com.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta una alternativa para remover metales pesados de aguas residuales que genera la industria galvánica de la Cd. de Monterrey. De acuerdo a los análisis el agua contiene Cr^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} y Ni^{+2} , en cantidades que rebasan la norma mexicana. La experimentación se realizó utilizando un equipo de prueba de jarras. Se utilizaron cuatro coagulantes: $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$ y $FeCl_3$. Éste último mostró el mejor nivel de remoción de los metales estudiados así como una velocidad de sedimentación más rápida. También se encontró una relación entre el nivel de remoción con el tamaño de los flóculos.



PALABRAS CLAVE

Coagulante, flóculos, sedimentación, precipitación, remoción, rompimiento.

ABSTRACT

In this investigation we present an alternative for removal of heavy metals from wastewaters of a galvanic industry in Monterrey, Mexico. The analysis reveals that the wastewater contains Cr^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} and Ni^{+2} , above the Mexican environmental standard. Four coagulants were used: $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$ and $FeCl_3$. $FeCl_3$ showed the best removal capacity of the metals involved and the fastest sedimentation speed. We also found a relationship between removal level and the floc size distribution.

KEYWORDS

Coagulant, flocs, sedimentation, precipitation, removal, break-up.

INTRODUCCIÓN

Trazas de algunos metales tales como arsénico, cobalto, germanio, níquel, rubidio y vanadio juegan un importante papel en la vida de muchos organismos, no obstante que algunos metales son esenciales para la vida, un exceso de éstos pueden ser una amenaza para la salud humana y para el medio ambiente.

El problema de la escasez de agua en cantidad y calidad es una preocupación mundial. Alrededor de 1,200 millones de personas todavía no tienen acceso al agua potable y 2,400 millones no tienen servicios sanitarios adecuados. Cada año

mueren cerca de 2 millones de niños a causa de enfermedades ocasionadas por el agua. En los países más pobres, uno de cada cinco niños muere antes de los cinco años de edad, principalmente por enfermedades infecciosas relacionadas con el agua, producidas como consecuencia de la insuficiencia de ésta, tanto en cantidad como en calidad. En los últimos 10 años, las enfermedades diarreicas, que son el resultado de la falta de servicios adecuados de agua y saneamiento, han causado la muerte a un número de niños mayor que el total de las personas que han muerto como consecuencia de conflictos armados después de la Segunda Guerra Mundial. Un porcentaje de las industrias que actualmente se instalan en los países en vías de desarrollo no cumplen con las normas de vertimiento de los países de origen, las cuales son más rigurosas en general que las nuestras. Se sabe que estas tecnologías son contaminantes y requieren por lo tanto una vigilancia mayor de sus vertimientos y el control adecuado de sus plantas de tratamiento, ya que de otra forma crearían graves daños al entorno.¹

Algunas industrias no tienen plantas de tratamiento, de esta forma el desastre es manifiesto. Cuando la industria posee tratamiento pero no funciona adecuadamente o no se tiene un control de sus vertimientos ocurren importantes afectaciones sobre las plantas municipales de tratamiento de residuales albañales.

En este trabajo se presenta una alternativa para remover los metales pesados de las aguas residuales que genera la industria galvánica de la Cd. de Monterrey. De acuerdo a los análisis practicados el agua contiene Cromo, Zinc, Níquel y Fierro, en cantidades que rebasan por mucho la norma mexicana. Esta investigación representa una parte de un proyecto mayor, el cual consiste en la selección del mejor coagulante inorgánico para remover dichos metales pesados en un equipo de prueba de jarras así como el tiempo óptimo de agitación. Este trabajo difiere a los otros en que cuatro metales son utilizados al mismo tiempo en las disoluciones a tratar, la mayoría de los trabajos reportados en la literatura consideran uno o dos metales para sus respectivas remociones.²⁻⁵

El proceso de remoción se desarrolla mediante la insolubilización de los hidróxidos de los metales

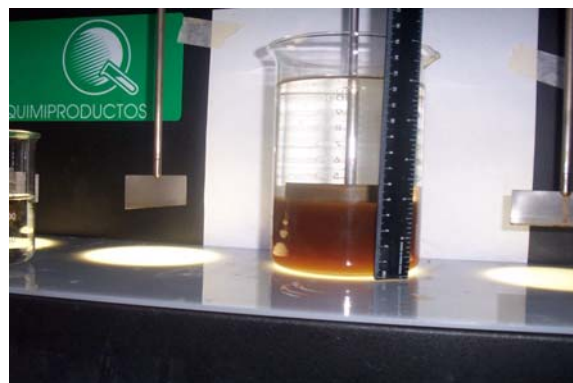
citados, posteriormente se procede a la coagulación a fin de lograr una mejor separación de las fases sólidas y líquidas. Los criterios de selección del mejor coagulante son: el nivel de remoción de los metales y la mejor curva de sedimentación del precipitado generado.

PARTE EXPERIMENTAL

En la experimentación se utilizó un equipo de prueba de jarras, el cual cuenta con paletas de agitación y donde pueden colocarse los vasos de precipitados que contienen la muestra para el tratamiento, el equipo puede controlar de manera muy precisa las velocidades y tiempos de agitación (ver figura 1a). Se prepararon las disoluciones a tratar utilizando para esto cloruro de zinc, cloruro de níquel, cloruro férrico y cloruro de cromo (III) en agua desmineralizada y destilada; la composición química del agua fue 447 ppm de Cr^{+3} , 200 ppm de Fe^{+3} , 27 ppm de Ni^{+2} y 750 ppm de Zn^{+2} a un valor de $\text{pH}=2.0$, ya que este es el pH y la composición química del agua residual generada en la industria galvánica. Se utilizó una disolución madre concentrada a fin de



(a)



(b)

Fig. 1. a) Equipo de jarras, b) Muestra de sedimentación.

preparar las disoluciones con la concentración deseada, las corridas experimentales iniciaron con la adición de hidróxido de sodio para aumentar el pH de la disolución de trabajo hasta lograr un pH =10 mientras que se agitaba vigorosamente a 150 rpm, posteriormente se adicionó la sustancia coagulante: Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, Sulfato Férrico y Sulfato Ferroso, los cuales se probaron cada uno por separado. En seguida se redujo la velocidad de agitación hasta 20 rpm y finalmente se neutralizó la disolución de nuevo hasta alcanzar un pH=10; la agitación lenta se realizó durante 10 minutos, se dejó sedimentar por espacio de 45 minutos y finalmente se separó el líquido de la fase sólida. El agua tratada se analizó utilizando el equipo de absorción atómica y las curvas de sedimentación se determinaron utilizando una escala métrica graduada en centímetros y milímetros (ver figura 1b), observando la altura de la separación de fases sólida y líquida en el tiempo. Las mediciones se realizaron durante 45 minutos totales hasta llegar a la etapa de compresión, sin embargo a partir de 10 minutos la fase sólida ya no disminuyó sustancialmente su altura, las mediciones se realizaron midiendo la interfase sólido-líquido desde el fondo del vaso. Se realizó además un análisis de los sedimentos generados mediante microscopía óptica a fin de estudiar la cinética de la floculación. Se tomaron 15 micrografías (fotografías) a bajos aumentos (40x) para cada diferente prueba en el equipo de jarras. Las 15 micrografías permitieron analizar al menos 1000 partículas para cada diferente muestra. El tamaño de los flóculos fue obtenido por análisis de imágenes en modo semi-automático.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la bibliografía consultada, la precipitación química asistida por sustancias coagulantes es ampliamente utilizada en Estados Unidos de América, las ventajas que se citan son: el equipamiento requerido no es sofisticado, los reactivos químicos utilizados son económicos y de fácil acceso, además no se requiere un operario con alto nivel de entrenamiento.⁶ En este tratamiento se utilizó la información sobre la solubilidad de los hidróxidos metálicos que se forman, ya que como es bien conocido, la solubilidad de éstos se ve afectada por el pH de la disolución.⁷ Se ha reportado el valor

de pH óptimo para la remoción de metales tales como Zn, Cd, Mn, y Mg de aguas residuales utilizando la precipitación y coagulación.²

Los resultados del análisis del agua tratada obtenidos por medio de absorción atómica se presentan en la tabla I. Como puede verse el coagulante cloruro férrico muestran el mejor nivel de remoción de los metales estudiados. Tal como se ha mencionado en la parte experimental, la concentración de los iones Cr^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} y Ni^{+2} en el agua sin tratar fueron 447, 200, 750 y 27 ppm respectivamente. Después del tratamiento utilizando FeCl_3 como coagulante, la concentración de estos iones llega a ser 0.25 ppm para el Cr^{+3} , 0.37 ppm para el Fe^{+3} , 0.80 para Zn^{+2} y menos de 0.20 ppm para el Ni^{+2} . En general, la concentración en partes por millón (ppm) de los metales en el agua tratada fueron menores utilizando cloruro férrico y sulfato férrico.

En esta investigación se hizo un estudio cuantitativo sobre el tamaño de los flóculos (coágulos) generados una vez terminada la agitación lenta para los diferentes coagulantes utilizados y se observó que para el caso del FeCl_3 (el coagulante que mostró los mejores niveles de remoción de metales pesados del agua a tratar) que este daba una curva de distribución de tamaño de partícula más grande (coágulos más

Tabla I. Resultados del análisis químico de las aguas tratadas realizado mediante absorción atómica.

Corrida con sulfato de aluminio			Corrida con cloruro férrico		
Ion Metálico	C Inicial (ppm)	C final (ppm)	Ion Metálico	C Inicial (ppm)	C final (ppm)
Cr+3	447	<0.20	Cr+3	447	0.25
Fe+3	200	0.66	Fe+3	200	0.37
Zn+2	750	19.64	Zn+2	750	0.80
Ni+2	27	<0.20	Ni+2	27	<0.20
Corrida con sulfato férrico			Corrida con sulfato ferroso		
Ion metálico	C inicial (ppm)	C final (ppm)	Ion metálico	C inicial (ppm)	C final (ppm)
Cr+	447	0.35	Cr+3	447	<0.20
Fe+3	200	0.38	Fe+3	200	0.26
Zn+2	750	1.66	Zn+2	750	1.13
Ni+2	27	<0.20	Ni+2	27	<0.20

grandes) en el sedimento. Con estos resultados se concluye que la remoción química de los metales pesados utilizados en este trabajo depende del tamaño de los flóculos formados. En la figura 2 se presentan muestras representativas de los precipitados para diferentes coagulantes utilizados (10 minutos de agitación en el equipo de pruebas de jarras).

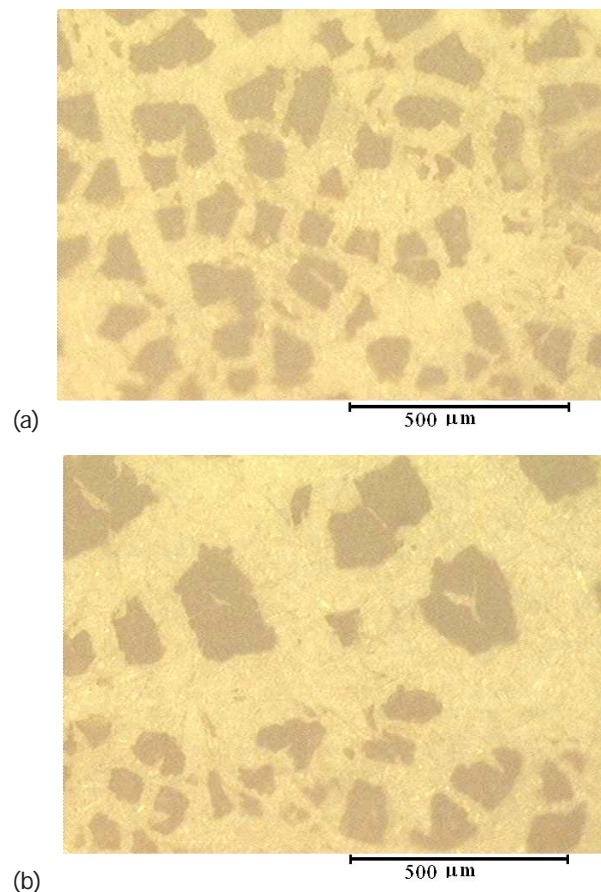


Fig. 2. Flóculos formados utilizando como coagulante: a) sulfato ferroso, b) cloruro férrico

En la figura 3 se muestran las curvas de sedimentación, la cual muestra las distancias de la fase sólida a partir del fondo del recipiente en función del tiempo. A partir de estos resultados puede observarse que el sulfato de aluminio muestra una curva poco aceptable de sedimentación (sedimentación muy lenta del precipitado), para este coagulante la fase sólida está más alejada del fondo del vaso, lo cual no es aplicable a nivel industrial; las curvas de sedimentación del sulfato férrico y la del cloruro férrico son las que muestran un mejor comportamiento (sedimentación más rápida).

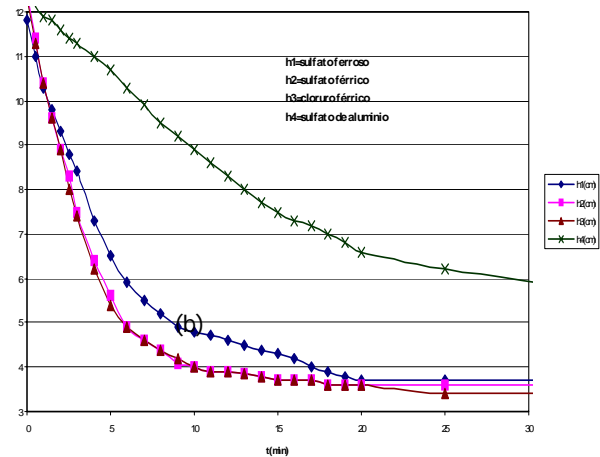


Fig. 3. Curvas de sedimentación para las diferentes sustancias coagulantes.

Las curvas de la rapidez con que la interfase sólida desciende, figura 3, se derivaron con respecto al tiempo una vez y se evaluó la velocidad de sedimentación en cada minuto. Mediante una técnica de análisis gráfico y un cambio a escala logarítmica en el tiempo, se determinó el punto de la curva de sedimentación en donde la curva empieza a convertirse asintótica, a este punto se le denomina velocidad crítica de sedimentación.⁸ Con base en estos resultados obtenidos se determinó la velocidad inicial de sedimentación, y la velocidad crítica de sedimentación. Nuevamente el cloruro férrico muestra la más grande velocidad inicial de sedimentación y la más grande velocidad crítica de sedimentación. Esta última se alcanza en 8 minutos, es decir, en menor tiempo que para los otros tres coagulantes probados.

En este trabajo también se estudió la cinética de floculación, para esto en el equipo de pruebas de jarras se tomó una muestra representativa del precipitado a cada minuto de agitación (tiempo de agitación total 10 minutos) para el análisis microscópico. En esta parte del estudio se utilizó solamente FeCl_3 como coagulante. La figura 4 presenta muestras representativas de los precipitados para los tiempos de agitación de 1, 3, 5, 7 y 10 minutos respectivamente. Para tiempos de 1 hasta 7 minutos de agitación se puede observar el crecimiento de los flóculos, sin embargo comparando microfografías entre 7 y 10 minutos de agitación se observa que a 10 minutos los flóculos son más pequeños que a 7

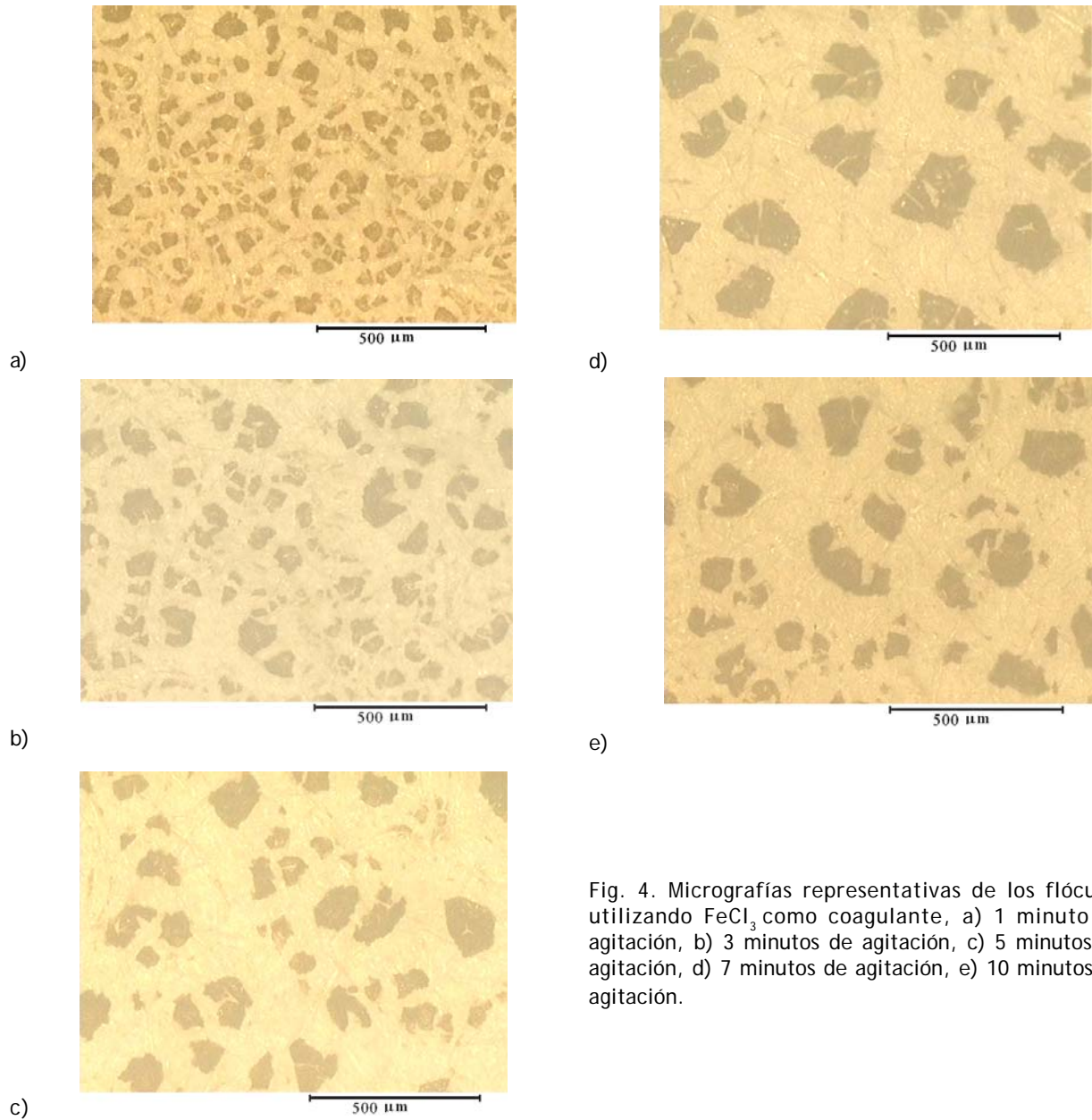


Fig. 4. Micrografías representativas de los flóculos utilizando FeCl_3 como coagulante, a) 1 minuto de agitación, b) 3 minutos de agitación, c) 5 minutos de agitación, d) 7 minutos de agitación, e) 10 minutos de agitación.

Tabla II. Resultados del análisis químico de las aguas tratadas realizado mediante absorción atómica utilizando FeCl_3 como coagulante.

FeCl_3 como coagulante (7 minutos)			FeCl_3 como coagulante (10 minutos)		
Ion metálico	C inicial (ppm)	C final (ppm)	Ion metálico	C inicial (ppm)	C final (ppm)
Cr+3	447	<0.20	Cr+3	447	0.25
Fe+3	200	<0.20	Fe+3	200	0.37
Zn+2	750	0.25	Zn+2	750	0.80
Ni+2	27	<0.20	Ni+2	27	<0.20

minutos de agitación, esto significa que probablemente un excesivo tiempo de agitación conduce a un rompimiento de los flóculos. El análisis químico de las aguas tratadas a 7 y 10 minutos de agitación es presentado en la tabla II. Los resultados muestran que a 7 minutos de agitación la remoción de los metales es ligeramente mejor que a 10 minutos, esto es, nuevamente que la remoción depende del tamaño de los flóculos en este estudio realizado. Con estos resultados previamente presentados se concluye que el tiempo óptimo de agitación es de 7 minutos utilizando FeCl_3 como coagulante. Con las condiciones de operación especificadas en la parte experimental en el equipo de jarras y un tiempo de agitación de 7 minutos se consiguió el mejor nivel de remoción de los metales estudiados.

CONCLUSIÓN

Los coagulantes cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso y sulfato de aluminio fueron utilizados para la separación de metales pesados de aguas residuales. El coagulante cloruro férrico (FeCl_3) mostró mejores resultados en cuanto a la remoción de iones Cr^{+3} , Fe^{+3} , Zn^{+2} y Ni^{+2} de aguas residuales, además da mejores resultados para la sedimentación de los precipitados, por lo cual sería un buen candidato para remover metales pesados de aguas residuales de la industria galvánica. Se encontró una relación entre el tamaño de los flóculos y el nivel de remoción de metales pesados. De acuerdo a los resultados de esta investigación el FeCl_3 mostró los mejores resultados de remoción, además por microscopía óptica se observó que los flóculos (precipitados) fueron más grandes utilizando FeCl_3 comparados éstos con los generados con sulfato férrico, sulfato ferroso y sulfato de aluminio. Igualmente, estudiando la cinética de floculación en el equipo de pruebas de jarras, se

encontró una relación entre el tamaño de los flóculos y nivel de remoción para FeCl_3 utilizado como coagulante y se determina que el tiempo óptimo de agitación deberá ser de 7 minutos para obtener los flóculos más grandes y el mejor nivel de remoción de los metales pesados.

REFERENCIAS

1. Cumbre Mundial Sobre el Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, Sudáfrica, 2002.
2. Chareerntanyarak, Lertchai., Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation, *Water Science and Technology* 39 (10-11) 135–138, 1999.
3. Guillard Damien and Alison E. Lewis, Nickel Carbonate Precipitation in a Fluidized-Bed Reactor, *Ing. Eng. Chem. Res.* 40, 5564-5569, 2001.
4. Guillard Damien and Alison E. Lewis, Optimization of Nickel Hydroxycarbonate Precipitation Using a Laboratory Pellet Reactor, *Ind. Eng. Chem.* 41, 3110-3114, 2002.
5. Matlock Matthew M., Brock S. Howerton, and David A. Atwood, Chemical Precipitation of Lead from Lead Battery Recycling Plant Wastewater, *Ind. Eng. Chem.* 41, 1579-1582, 2002.
6. EPA, United States Environmental Protection Agency. Wastewater Technology Fact Sheet Chemical Precipitation, EPA 832-F-00-018, 2000.
7. Baltpurvins Karlis A., Robert C. Burns, and Geoffrey A. Lawrance. Use of the Solubility Domain Approach for the Modeling of Hydroxide Precipitation of Heavy Metals from Wastewater, *Environ. Sci. Technol.* 30, 1493-1499, (1996).
8. Foust A. S, L. A. Wenzel, C. W. Clump, L. Maus, L. B. Andersen. Principios de Operaciones Unitarias, Cía. Editorial Continental, Mexico, 1985.