

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA DE CARBÓN  
MEDIANTE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO.

ALEXANDER SANMIGUEL SANMIGUEL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2013

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA DE CARBÓN  
MEDIANTE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO.

ALEXANDER SANMIGUEL SANMIGUEL

Trabajo de Grado para optar al título de  
Químico

Director

Edgardo Portilla Restrepo

Qco. Msc. en Derecho. Programa en Derecho de los Recursos Naturales

Codirector

Marianny Yajaira Combariza M.

Qca. PhD. Química Analítica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2013

## DEDICATORIA

Dedicado a Dios, por darme la sabiduría, la inteligencia, la paciencia y el espíritu de fortaleza para soportar los malos momentos y superarlos de la manera adecuada.

Dedicado a mis padres y mi familia, por todos los sacrificios realizados durante todo este tiempo, buscando siempre lo mejor para mí a lo largo de mi formación académica.

Dedicado especialmente a Diana Carolina Prada Robles, por su apoyo, su paciencia y dedicación, lo cual fue una fuente de inspiración increíble y una motivación adicional muy importante para alcanzar esta meta.

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS por el apoyo brindado a este proyecto como alternativa para el desarrollo científico, tecnológico y empresarial del país.

Al Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales –CEIAM– y especialmente a la Dra. Marianny Yajaira Combariza, como codirectora del proyecto, por toda la atención, la colaboración y la orientación brindada durante el desarrollo de las actividades propias de esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Química y a todos los docentes y administrativos adscritos a sus dependencias, los cuales colaboraron en mi formación académica e hicieron posible la construcción de los conocimientos necesarios para el desarrollo de este proyecto y el cumplimiento de los objetivos propuestos.

A todos mis amigos y compañeros de clases, porque pude aprender muchas cosas de cada uno de ellos, las cuales me llenaron de fortaleza y me permitieron conservar la fe y la esperanza.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. MARCO CONCEPTUAL .....	19
1.1. POLÍMEROS.....	19
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS.....	19
1.3. INTERCAMBIO IÓNICO Y RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO .....	22
1.3.1. Intercambio iónico.....	22
1.3.2. Clasificación de intercambiadores iónicos.....	24
1.3.3. Usos del intercambio iónico .....	28
1.4. ADSORCIÓN .....	30
1.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE FREUNDLINCH Y LANGMUIR.....	31
1.5.1. Isoterma de adsorción.....	31
1.6. DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM) Y TRATAMIENTO.....	33
1.6.1. Drenaje ácido de mina .....	33
1.6.2. Tratamiento del DAM .....	34
1.6.3. Ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento de DAM.....	37
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	41
2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DE MINERÍA.....	41
2.2. PRUEBA DE RESINA DE INTERCAMBIO.....	42

2.2.1.	Preparación de solución de activación de resina Lewatit S100 .....	42
2.2.2.	Preparación de solución de activación de resina Lewatit Monoplus M500	42
2.2.3.	Activación de las resinas .....	42
2.2.4.	Pruebas a condiciones ambientales .....	43
2.2.5.	Pruebas a condiciones controladas .....	44
2.3.	PRUEBAS PRELIMINARES EN COLUMNA PARA RESINA CATIÓNICA ...	46
2.4.	DETERMINACIÓN DE CINÉTICA DEL PROCESO .....	47
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	50
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DE MINERÍA .....	50
3.2.	PRUEBA DE RESINA DE INTERCAMBIO .....	53
3.2.1.	Prueba de resina a condiciones ambientales .....	53
3.2.2.	Prueba de resina a condiciones controladas .....	67
3.3.	PRUEBAS PRELIMINARES EN COLUMNA PARA RESINA CATIÓNICA ...	75
3.4.	CINÉTICA DEL PROCESO .....	79
4.	CONCLUSIONES .....	85
5.	RECOMENDACIONES .....	87
	BIBLIOGRAFÍA .....	88
	ANEXOS .....	93

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de las isotermas de Freundlich y Langmuir. ....	33
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento de DAM. ....	38
Tabla 3. Peso de sustancias para preparación de solución patrón. ....	44
Tabla 4. Especificaciones técnicas de Espectrofotómetro HACH DR-2800. ....	48
Tabla 5. Especificaciones técnicas equipo multiparámetro HANNA HI991301 y sonda HI1288. ....	49
Tabla 6. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander .....	50
Tabla 7. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá.....	51
Tabla 8. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Análisis 1.....	54
Tabla 9. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Análisis 2.....	54
Tabla 10. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Análisis 3.....	54
Tabla 11. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Valores promedio. ....	55
Tabla 12. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Análisis 1 .....	60
Tabla 13. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Análisis 2.....	60
Tabla 14. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Análisis 3.....	61
Tabla 15. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Valores promedio. ....	61

Tabla 16. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Análisis 1. ....	67
Tabla 17. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Análisis 2. ....	68
Tabla 18. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Análisis 3. ....	68
Tabla 19. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Valores promedio. ....	69
Tabla 20. Variación de la concentración de iones metálicos. Tratamiento de patrón en columna. ....	75
Tabla 21. Valores de C y Co-C calculados.....	80
Tabla 22. Datos iniciales calculados para la determinación de las isothermas de Freundlich y Langmuir. ....	81

## LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Imagen de celulosa MBE. ....	25
Figura 2. Polímero de estireno-divinilbenceno. ....	26
Figura 3. Variación de concentración de sólidos totales presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento. ....	55
Figura 4. Variación de concentración de iones Fe presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento. ....	56
Figura 5. Variación de concentración de iones sulfato presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento. ....	56
Figura 6. Variación de conductividad eléctrica en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento. ....	57
Figura 7. Variación de concentración de cationes presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento. ....	58
Figura 8. Variación de concentración de cationes presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento. ....	59
Figura 9. Variación de concentración de sólidos totales presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento. ....	62
Figura 10. Variación de concentración de iones Fe presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento. ....	62
Figura 11. Variación de concentración de iones sulfato presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento. ....	63
Figura 12. Variación de conductividad eléctrica en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento. ....	64
Figura 13. Variación de concentración de cationes presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento. ....	65

Figura 14. Variación de pH en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento.....	66
Figura 15. Variación de concentración de sólidos totales presentes en el patrón tratado .....	70
Figura 16. Variación de concentración de iones Fe presentes en el patrón tratado .....	70
Figura 17. Variación de concentración de iones sulfato presentes en el patrón tratado .....	71
Figura 18. Variación de conductividad eléctrica en el patrón tratado .....	72
Figura 19. Variación de concentración de cationes presentes en el patrón tratado .....	73
Figura 20. Variación de pH en el patrón tratado.....	74
Figura 21. Variación de concentración de hierro en patrón tratado en columna....	76
Figura 22. Variación de concentración de aluminio en patrón tratado en columna.	76
Figura 23. Variación de concentración de manganeso en patrón tratado en columna.....	77
Figura 24. Variación de concentración de zinc en patrón tratado en columna .....	77
Figura 25. Variación de concentración de soluto vs variación de concentración de soluto en el sólido .....	81
Figura 26. Isoterma de adsorción de Freundlich linealizada .....	82
Figura 27. Isoterma de adsorción de Langmuir linealizada .....	83

## LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. FICHA TECNICA RESINA LEWATIT S100.....	93
ANEXO B. FICHA TECNICA RESINA LEWATIT MONOPLUS M500 .....	100
ANEXO C. RESULTADOS PRUEBA PRELIMINAR AGUA RESIDUAL MINA SANTANDER .....	107
ANEXO D. RESULTADOS PRUEBA PRELIMINAR AGUA RESIDUAL MINA BOYACÁ .....	110

## RESUMEN

TÍTULO: TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA DE CARBÓN MEDIANTE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO\*

AUTOR: ALEXANDER SANMIGUEL SANMIGUEL\*\*

Palabras claves: DAM, resinas, intercambio iónico, adsorción, remoción, Langmuir.

La ejecución de actividades para la explotación de carbón, genera como resultado la formación drenajes ácidos de minería (DAM), los cuales son considerados como potenciales agentes contaminantes, pues contienen sustancias denominadas de interés sanitario, razón por la cual requieren de un tratamiento específico antes de ser vertidas a las fuentes hídricas receptoras. El tratamiento que se lleva a cabo actualmente, se realiza mediante procedimientos tradicionales como la oxidación química, empleando sustancias como la cal o la soda caustica, las cuales generan a su vez precipitados con altos contenidos de iones metálicos en forma de hidróxidos, que no son tratados para su posterior eliminación, aumentando de esta manera el potencial grado de contaminación producida por las actividades mineras, razón por la cual estos procedimientos no ofrecen resultados que se acoplen a las exigencias de las autoridades ambientales.

Con el propósito de estudiar nuevas tecnologías que permitan un adecuado tratamiento de los DAM y a su vez ofrezcan resultados acordes a lo exigido por normatividad ambiental vigente, se analizaron las resinas de intercambio iónico como posible mecanismo alternativo o complementario en el tratamiento de las aguas residuales de minería de carbón, para lo cual se emplearon las resinas Lewatit S100 y Lewatit Monoplus M500. Los resultados obtenidos mostraron que la remoción de iones depende de la cantidad de resina empleada. De igual manera, las resinas utilizadas mostraron porcentajes de remoción superiores al 90% bajo condiciones controladas. También se observó que el proceso de tratamiento presentó un comportamiento cinético propio de las isotermas de Langmuir y es de carácter reversible. Para el tratamiento llevado a cabo en columna, se observó que la resina de intercambio catiónico presentó una remoción efectiva de iones hasta los 90 minutos de tratamiento, tiempo a partir del cual, empezó a presentar disminución del porcentaje de remoción.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Edgardo Portilla Restrepo. Marianny Yajaira Combariza M.

## ABSTRACT

TITLE: WASTEWATER TREATMENT OF COAL MINING BY ION EXCHANGE RESINS<sup>\*</sup>

AUTHOR: ALEXANDER SANMIGUEL SANMIGUEL<sup>\*\*</sup>

Key Words: ADM, resins, ion exchange, adsorption, removal, Langmuir.

The execution of activities for coal mining, resulting in the formation of acid mine drainage (AMD), which are considered as potential pollutants, because contain substances called substances of health interest, and require specific treatment before to discharge into receiving water sources. The treatment performed currently is carried out using conventional procedures, such as chemical oxidation, using substances as lime or caustic soda, which generate precipitates with high levels of metal ions in the form of hydroxides, which are not treated for disposal, thus increasing the potential degree of pollution caused by mining activities, reason that these procedures do not provide results that fit the requirements of environmental authorities.

With the purpose to study new technologies that allow a proper treatment of ADM and provide results consistent with the requirements of current environmental regulations, were analyzed ion exchange resins as a possible alternative or complementary mechanism in the treatment of wastewater coal mining, for which we used resins Lewatit S100 and Lewatit Monoplus M500. The results showed that removal of ions depends on the amount of resin used. Similarly, the resins used showed removal percentages above 90% under controlled conditions. Also found that the treatment process presented a kinetic behavior of the Langmuir isotherm and is reversible. For the treatment carried out in column, the cation exchange resin showed effective removal of ions to 90 minutes of treatment, after this time, began to show a decline in the percentage of removal.

---

<sup>\*</sup> Degree Work

<sup>\*\*</sup> Faculty of Science. School of Chemistry. Edgardo Portilla Restrepo. Marianny Yajaira Combariza M.

## INTRODUCCIÓN

Según datos de presentados por la Unidad de Planeación Minero Energética de la República de Colombia - UPME, en los últimos años el sector minero se ha consolidado como uno de los sectores económicos más dinámicos dentro de la economía, lo cual se ve reflejado en el aporte realizado por dicho sector al crecimiento del producto interno bruto - PIB.

Adicionalmente, datos presentados por la Asociación Nacional de Industriales – ANDI muestran que, a Diciembre de 2007 el 30% del aérea total titulada en Colombia y el 18% de los 6955 títulos mineros otorgados por INGEOMINAS pertenecen al sector de la minería de carbón, siendo compañías como Drummond, Anglo American Coal Xstrata, Rio Tinto y Greystar Resources, las empresas con mayor inversión en este sector.

Actualmente la UPME estima, que para el año 2012 la producción minera de carbón superara la barrera de las 100 Megatoneladas anuales, siempre y cuando se logren resolver los problemas de movilidad y transporte en el país, lo cual genera grandes expectativas de inversión a futuro dado el amplio potencial geológico minero disponible en el país, la diversidad de ambientes, y las facilidades que el estado colombiano ofrece para estimular la inversión privada.

De manera simultánea con este crecimiento del sector minero, se ha venido presentando un crecimiento en el desarrollo de criterios de sostenibilidad ambiental de los proyectos mineros en el país, los cuales propenden por la conservación y uso racional de los recursos naturales, razón por la cual en los

últimos años, los requerimientos ambientales han aumentado su nivel de exigencia presentando nuevas disposiciones. No obstante, vemos como a nivel nacional aún existen proyectos mineros que funcionan sin el cumplimiento de los requerimientos de ley mineros y ambientales, realizando inadecuadamente, vertimientos de aguas residuales provenientes de las actividades mineras, generando graves problemas de contaminación ambiental que se ven reflejados en el deterioro de los elementos que conforman los ecosistemas ubicados dentro de las zonas de influencia directa o indirecta de estos proyectos, afectando principalmente uno de los elementos ambientales más susceptibles de alteración antropogénica como lo es el recurso hídrico.

Cabe señalar que, el incumplimiento de la normatividad ambiental, en cuanto a vertimientos se refiere, se debe principalmente a los mecanismos actualmente empleados para el tratamiento de los drenajes ácidos de minería, toda vez que estos son rudimentarios y emplean tecnologías tradicionales que desconocen la composición de estos drenajes ácidos y la composición de los residuos producidos durante el proceso de tratamiento.

Dada las condiciones actuales del sector minero a nivel nacional, se hace necesario la investigación de nuevas tecnologías que permitan realizar el tratamiento de los DAM de manera sostenible y amigable para el ambiente, razón por la cual se analizaron las resinas de intercambio iónico Lewatit S100 y Lewatit Monoplus M500 como posibles métodos alternativos o complementarios para el tratamiento de aguas residuales de minería de carbón.

Los resultados obtenidos en el presente estudio, permitieron determinar que las resinas de intercambio iónico empleadas, no solo son efectivas para el tratamiento

de DAM provenientes de las minas ubicadas en los departamentos de Santander y Boyacá; también se pudo observar que estas funcionaron de manera efectiva a condiciones extremas, toda vez que soportaron el tratamiento de soluciones patrón con concentraciones 10 veces superiores a las reportadas en la caracterización inicial de los drenajes ácidos de las minas objeto del presente análisis.

Adicionalmente, se pudo identificar el comportamiento del proceso de tratamiento, obteniendo como resultado, que este realiza de acuerdo con lo expresado matemáticamente por la isoterma de adsorción de Langmuir, lo cual permite establecer que el proceso se realiza en una mono capa y la adsorción es de tipo reversible, situación que se pudo confirmar en la prueba en columna realizada para la cual se empleó la resina Lewatit S100.

Finalmente, este estudio permitió establecer que el tratamiento de DAM empleando resinas de intercambio iónico, es un mecanismo que permite cumplir con la normatividad ambiental vigente para el manejo y disposición de vertimientos, pues las concentraciones obtenidas del DAM tratado con resinas de intercambio iónico en sistema de columna empacada, presentaron una reducción superior al 90% durante los primeros 90 minutos de tratamiento, lo cual a su vez es superior a lo exigido por la normatividad ambiental vigente, pues esta exige que la reducción de los agentes contaminantes obtenidos en el proceso de tratamiento sea superior al 80%.

## 1. MARCO CONCEPTUAL

### 1.1. POLÍMEROS

Los polímeros corresponden a un tipo particular de macromoléculas, las cuales se forman por medio de un proceso químico llamado *reacción de polimerización*, el cual consiste en la repetición de una estructura básica conocida como monómero, que al unirse mediante enlaces de tipo covalente con otras estructuras de las mismas características, forman largas cadenas. Los monómeros, son los encargados de definir la complejidad del polímero, puesto que su poca voluminosidad les permite unirse más fácilmente a otros del mismo tipo, otorgando así excelentes propiedades fisicoquímicas al polímero.

### 1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros pueden ser clasificados de diferente manera teniendo en cuenta aspectos como su origen, sus propiedades físicas, el tipo de reacción de polimerización o la estructura molecular de la cadena que lo conforma.

De acuerdo al origen se clasifican en:

- Polímeros Naturales. Sustancias producidas por organismos vivientes que son empleadas sin ningún tipo de modificación, principalmente en sus procesos biológicos. Entre ellos se encuentran: proteínas, polisacáridos, caucho natural entre otros.

- Polímeros sintéticos. Son macromoléculas de tipo artificial y se dividen en diferentes categorías según sus propiedades físicas (termoplásticos, termoestables, termofraguados, elastoméricos, cristalinos, amorfos e isómeros), según su método de obtención (adición o condensación), según la configuración de los átomos de los monómeros constituyentes (tácticos, sindiotácticos y atácticos).

Según sus propiedades físicas se dividen en:

- Termoplásticos. Son polímeros rígidos a temperatura ambiente y presentan una temperatura de ablandamiento, a la cual se hacen blandos y viscosos, debido a la ruptura de las fuerzas de atracción de las cadenas poliméricas que los conforman, haciéndolos susceptible a la ataque de solventes y otros tipos de sustancias ambientales.
- Termoestables. También son conocidos como termofijos y se caracterizan por ser polímeros que bajo la acción del calentamiento, sufren ruptura de los enlaces que los conforman, lo cual conlleva a alteraciones físicas y químicas de descomposición que evita que puedan ser remodelados a su estado inicial.
- Termofraguados. Son polímeros que debido a la existencia de enlaces entrecruzados pueden formar una masa sólida dura e insoluble bajo la exposición a temperaturas de mediano orden. Un ejemplo clásico de este tipo de polímeros es la bakelita.

- Elastoméricos. Polímeros de gran flexibilidad y alto grado de elasticidad la cual se deriva de su estado poco amorfo. Poseen baja temperatura de transición vítrea debido al bajo entrecruzamiento con cadenas de formas irregulares.
- Cristalinos. Presentan una estructura espacial ordenada y carecen de cadenas secundarias unidas a la cadena principal.
- Amorfos. Son polímeros con estructura espacial irregular o desordenada la cual permite el paso de la luz fácilmente a través de ella.
- Isómeros. Son polímeros que presentan la misma composición porcentual, pero difieren en la ubicación de átomos o grupos de átomos dentro de la estructura principal.

Teniendo en cuenta la configuración de los átomos de los monómeros constituyentes se agrupan en:

- Tácticos. Polímeros que poseen una regularidad en la orientación hacia la misma dirección de los monómeros constituyentes.
- Sindiotácticos. Poseen una regularidad alternada en la orientación de los grupos funcionales de los monómeros constituyentes.

- Atácticos. Presentan una visible irregularidad en cuanto a la orientación de los grupos funcionales de los monómeros constituyentes.

De igual manera, existen otras formas de clasificar los polímeros, las cuales se encuentran asociadas al tipo de reacción de polimerización empleada, la estructura de la cadena o las unidades monoméricas que los componen.

### 1.3. INTERCAMBIO IÓNICO Y RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

1.3.1. Intercambio iónico. Es una reacción química de carácter reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por un ión de igual signo o carga que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil.

La ciencia de intercambiar iones empleando una matriz es una metodología muy antigua. Aristóteles menciona que haciendo pasar agua de mar a través de un recipiente de cera se obtiene agua dulce.

Las propiedades de las arcillas como intercambiadores de iones se conocen desde el siglo XIX, atribuyendo la primera observación de este fenómeno a Thompson y Way, cuyos estudios fueron publicados en 1850. En sus experimentos hicieron pasar una solución de sulfato o nitrato de amonio a través de diversas muestras de arcillas, observando que el filtrado obtenido contenía iones de calcio en lugar de iones de amonio. La importancia de estos resultados frente al proceso de intercambio iónico no fue tomada en cuenta hasta que Hennerberg, Stohmann y Eichhorn demostraron su reversibilidad en 1850.

En 1870, los estudios realizados por Lemberg sobre la capacidad de intercambio de las zeolitas ampliaron los conocimientos sobre el proceso de intercambio iónico. De hecho las zeolitas son un ejemplo clásico que demuestra la capacidad de los minerales para realizar procesos de intercambio, hecho que fue comprobado en 1927 al emplearse la primera columna de zeolita para eliminar iones calcio y magnesio que interferían en la determinación cuantitativa del contenido de sulfato en el agua.

El aporte más significativo a al desarrollo de los procesos de intercambio iónico fue la síntesis de resinas orgánicas, la cual fue llevada a cabo en 1935 por los químicos Basil Adams y Eric Holmes del Departamento de Investigación Científica e Industrial de Reino Unido. Estos investigadores desarrollaron polímeros de tipo orgánico que imitaban a las zeolitas mediante la condensación entre el fenol y el formaldehído. Sustituyendo el fenol por derivados de este se dio origen a las resinas de intercambio aniónicas y catiónicas.

A finales de la segunda guerra mundial, se sintetizaron mediante reacciones de adición los primeros polímeros intercambiadores de iones, los cuales presentaban mayor estabilidad térmica y química que las resinas de condensación. El pionero de esta técnica fue Gaetano D'Alenio, quien incorporó grupos del ácido sulfónico a un polímero de estireno entrecruzado con divinilbenceno dando lugar a resinas catiónicas de ácido fuerte. En 1947, Mcburney produjo las resinas aniónicas de base fuerte cuyo grupo funcional era un amino cuaternario.

En 1948, Skogseid sintetiza la primera resina específica para un metal (potasio), desde este momento los investigadores basaron sus esfuerzos en incorporar a la matriz de resina diversos grupos funcionales que potenciaran la selectividad por un compuesto determinado dando origen de esa manera a las resinas quelantes.

Desde entonces se ha continuado la investigación y el desarrollo de nuevas estructuras poliméricas ha dado lugar a una serie de modernas resinas cuya aplicación industrial ha sido enorme.

1.3.2. Clasificación de intercambiadores iónicos. Los intercambiadores iónicos forman un grupo de materiales muy heterogéneo, cuya única característica común es la presencia de una carga eléctrica fija capaz de enlazar iones de carga eléctrica opuesta. Estos se clasifican en dos grandes grupos: intercambiadores orgánicos e inorgánicos, donde ambos incluyen materiales tanto naturales como sintéticos.

1.3.2.1. Intercambiadores iónicos inorgánicos. Naturales: Son aluminosilicatos tales como zeolitas, arcillas minerales y feldespatos.

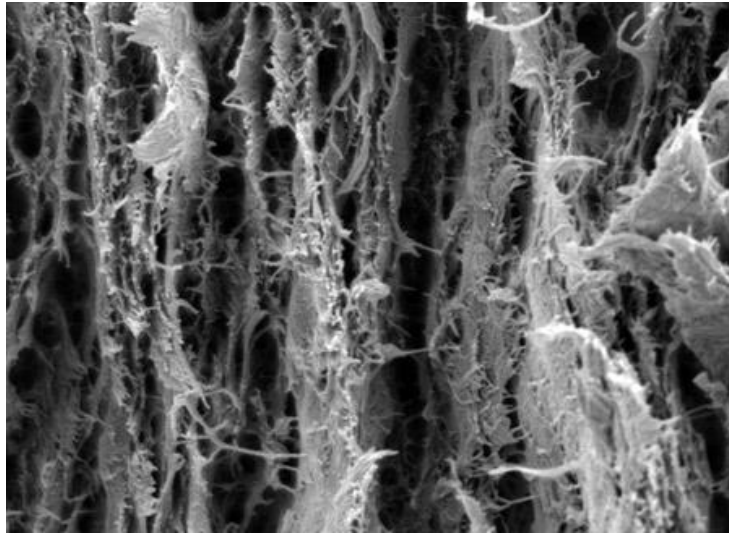
Sintéticos: Generalmente se subdividen en las siguientes categorías: Óxidos metálicos hidratados, sales insolubles en metales polivalentes, sales insolubles en heteropoliácidos, sales complejas de hexacianoferratos insolubles, zeolitas sintéticas.

1.3.2.2. Intercambiadores iónicos orgánicos. Resinas Orgánicas Naturales. Existen varios polímeros de origen natural que actúan como intercambiadores iónicos, entre ellos tenemos la celulosa, el ácido algínico, dextrano, agarosa, chitina y quitosan.

Estos últimos son dos polisacáridos naturales que han mostrado excelentes propiedades para la fijación de metales. La chitina es un polímero lineal de alto peso molecular de la N-acetil-D-glucosamina, el cual abunda en las paredes

celulares de algunos hongos y el caparazón de algunos crustáceos, mientras que el quitosán es un derivado de la quitina que se obtiene por hidrólisis de esta última; consiste en uniones de D-glucosamina y la presencia de nitrógeno en su estructura, lo cual permite que sea empleado como polímero quelante de metales.

Figura 1. Imagen de celulosa MBE.



Fuente: renovablesverdes.com

**Resinas Orgánicas Sintéticas.** Las resinas sintéticas consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y derivatizada con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales. Son los materiales más empleados en procesos de intercambio iónico a escala industrial. La mayoría tiene como estructura base el estireno-divinilbenceno debido a su resistencia física y química, a la temperatura y a su estabilidad en cualquier rango de pH. También se emplean matrices poliméricas basadas en el ácido acrílico o metacrílico.

Figura 2. Polímero de estireno-divinilbenceno.



Fuente: filtrantes.com.mx

Hay dos métodos para la obtención de resinas funcionalizadas:

- Incorporar el grupo funcional durante el proceso de polimerización empleando por ejemplo monómeros ya funcionalizados.
- Llevar a cabo el proceso de polimerización y posteriormente introducir los grupos funcionales sobre la matriz polimérica realizando reacciones como sulfonación o cloración-aminación.

Dadas las limitaciones que genera el entrecruzamiento de las cadenas, el proceso más empleado es el segundo, a pesar de que el primero produce resinas más homogéneas.

Según la estructura de la red, la resina se pueden clasificar así: tipo gel, resinas macroporosas y resinas isoporosas.

Según su grupo funcional las resinas se clasifican en:

- Resinas catiónicas de ácido fuerte. Se producen mediante sulfonación con ácido sulfúrico.
- Resinas catiónicas de ácido débil. El grupo funcional es el ácido carboxílico el cual se encuentra presente en uno de los monómeros constituyentes, generalmente el ácido acrílico o metacrílico.
- Resinas aniónicas de base fuerte. Se obtienen de la reacción de estireno-divinilbenceno clorometilado con aminas terciarias. Su grupo funcional corresponde a una sal de amonio cuaternario.
- Resinas aniónicas de base débil. Resinas funcionalizadas con grupos amino primario, secundario o terciario. Suelen emplearse en la adsorción de ácidos fuertes presentando buena capacidad de intercambio, aunque su cinética es lenta.
- Resinas quelantes. En este tipo de resinas el grupo funcional tiene las propiedades de un reactivo específico, ya que forma quelatos con iones metálicos. Su principal ventaja es que presentan afinidad por metales de transición y el carácter de ácido débil del grupo funcional permite la regeneración de la misma con un ácido mineral. Son poco empleadas a nivel industrial debido a su costo y presentan una cinética de absorción lenta.
- Resinas Impregnadas. Son resinas que constan de un soporte polimérico que se impregna con una disolución orgánica que contiene a un extractante selectivo a un metal específico. Su principal desventaja es la pérdida del disolvente lo cual reduce su aplicabilidad.

Factibilidad fundamental del intercambio iónico.

- Las reacciones de intercambio iónico son de carácter estequiométrico, es decir, por cada equivalente gramo de iones en solución captado por la resina, el mismo número de equivalente gramo es liberado por la resina hacia la solución.
- Las reacciones de intercambio son reversibles en su mayoría.
- Todos los grupos de iones activos en una resina de intercambio son considerados accesibles como lugares potenciales de intercambio para iones pequeños.
- Cualquier compuesto que sea soluble y se ionice es susceptible de intercambio.
- La economía del proceso está directamente relacionada con la clase y la cantidad de iones intercambiables.

1.3.3. Usos del intercambio iónico. En la actualidad se presentan diversas aplicaciones de las resinas de intercambio iónico, las cuales aprovechan las propiedades y ventajas de las mismas con el propósito de eliminar sales cuando éstas se encuentran en bajas concentraciones, siendo la desmineralización y el ablandamiento de aguas la aplicación más conocida en este campo, así como la desmineralización de jarabes de azúcar.

De acuerdo con el documento titulado, *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*, publicado conjuntamente en el año 2005 por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), se establece que las resinas de intercambio iónico, debido a sus características, es un medio especial para la remoción de arsénico en el agua. Así mismo, establece que la efectividad de remoción de esta sustancia depende del estado de oxidación del arsénico, reportando que la máxima efectividad de las mismas se da cuando existe presencia de As(V) en el agua, en caso contrario, se debe realizar un tratamiento de oxidación previo al proceso de intercambio iónico. Finalmente, se reporta que las resinas sulfato-selectivas y nitrato-selectivas, son las más empleadas para la remoción de arsénico y su efectividad depende de la concentración de sulfato y nitrato en el agua cruda, y la forma como estos iones se intercambian antes del arsénico.

En cuanto al manejo y tratamiento de agua potable se refiere, la Comisión Nacional de Agua de México, en su *Manual de Agua Potable y Alcantarillado* publicado en el año 2007, presenta las resinas de intercambio iónico como un método para la remoción de iones indeseables en el agua, principalmente la eliminación de calcio y magnesio (ablandamiento), desmineralización, eliminación de amonio y separación de metales pesados.

Grágeda Zegarra (2006), establece que los procesos de intercambio iónico también se aplican en la hidrometalurgia para la recuperación y concentración de metales tales como cobre, uranio, cromo, oro platino y plata, presentando de esta manera a las resinas de intercambio iónico, como una posible solución al tratamiento de efluentes procedentes de la industria de refinado de metales. De otra parte, también se presentan las resinas de intercambio iónico como alternativa para la eliminación de iones nitrato y amonio de las aguas naturales, los cuales provienen de las aguas residuales resultantes de los procesos de explotación ganadera y agrícola.

#### 1.4. ADSORCIÓN

La adsorción es el fenómeno de concentración o depósito de una sustancia llamada *soluta* o *adsorbato*, sobre la superficie de un sólido o líquido denominado *adsorbente*.

La adsorción se debe principalmente a la presencia de fuerzas intermoleculares sin balancear en las moléculas ubicadas en la interfase (sólida o líquida), generando fenómenos de atracción sobre moléculas de otras sustancias que al entrar en contacto con la superficie adsorbente equilibran las fuerzas atractivas de las mismas disminuyendo así la energía superficial.

La interfase puede ser:

- Sólido – gas
- Sólido – líquido
- Líquido – gas
- Líquido – líquido

Aunque actualmente se presentan diferentes modelos matemáticos para explicar los procesos de adsorción isotérmicos, solo existen dos tipos de isothermas de adsorción bien definidas: isothermas de adsorción de Freundlich e Isothermas de adsorción de Langmuir, las cuales permiten estudiar de manera adecuada el comportamiento de los sistemas de adsorción.

## 1.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE FREUNDLINCH Y LANGMUIR

1.5.1. Isoterma de adsorción. También conocida como isoterma de sorción, es una relación matemática entre la masa de un soluto adsorbido y la masa del soluto en solución, a temperatura constante. Se obtienen principalmente a partir de datos producto de mediciones experimentales, las cuales son sometidas a análisis por regresión lineal. Las isotermas de adsorción más empleadas son las isotermas de Freundlich y Langmuir.

1.5.1.1. Isoterma de adsorción de Freundlich. Se define como una isoterma que relaciona la concentración de un soluto presente en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto presente en el líquido con el que está en contacto.

Se expresa matemáticamente como:

$$q = kC^{\frac{1}{n}}$$

Esta ecuación se puede linealizar aplicando logaritmo natural a la ecuación, resultando la expresión lineal de la concentración del soluto en el sólido con respecto a la concentración de soluto.

$$\ln q = \ln k + \frac{1}{n} \ln C$$

Dónde:

$q$  = concentración de soluto en el solido

$C$  = concentración de soluto

$K$  y  $1/n$  son constantes dadas para un adsorbato y adsorbente dados a una temperatura en particular.

1.5.1.2. Isoterma de adsorción de Langmuir. Al igual que en el caso anterior la isoterma de adsorción de Langmuir también relaciona la concentración de un soluto presente en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto presente en el líquido con el que está en contacto.

Se expresa matemáticamente como:

$$\frac{q}{q_s} = \frac{kC}{1 + kC}$$

Esta ecuación se puede linealizar, resultando la expresión lineal del inverso de la concentración del soluto en el sólido con respecto al inverso de la concentración de soluto.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_s k C} + \frac{1}{q_s}$$

Dónde:

$q$  = concentración de soluto en el solido

$q_s$  = máxima cantidad de soluto que puede adsorberse por g de adsorbente

$C$  = concentración de soluto

$k$  = constante de equilibrio de adsorción

La tabla 1 señala algunas características propias para cada uno de estos modelos y que permitirán establecer el mejor comportamiento de la adsorción llevada a cabo en sistemas continuos.

Tabla 1. Características de las isotermas de Freundlich y Langmuir.

ISOTERMA DE FREUNDLICH	ISOTERMA DE LANGMUIR
Temperatura constante	Temperatura constante
Superficie rugosa (microporosa)	Adsorción localizada solo en sitios definidos de la superficie (sitios activos)
Distribución exponencial de la energía de los sitios de adsorción	La energía de adsorción es la misma para todos los sitios activos
No supone la formación de mono capa	La superficie es homogénea y se forma una mono capa, asumiendo que cada sitio de adsorción solo puede adherir solo una molécula de adsorbato

Fuente: [cnea.gov.ar](http://cnea.gov.ar)

## 1.6. DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM) Y TRATAMIENTO

1.6.1. Drenaje ácido de mina. Se caracteriza por ser un agua residual; se forma por la reacción química que se presenta entre el agua, el aire y las rocas del suelo (las cuales contienen azufre), para dar como productos finales hierro disuelto y ácido sulfúrico, el cual a su vez disuelve otros metales presentes en el suelo tales como cobre, mercurio, zinc, manganeso, plomo, entre otros.

Debido a la presencia del ácido sulfúrico, el flujo derivado de esta reacción química tiende a ser de carácter ácido, lo cual se demuestra por bajos valores de pH, y se puede encontrar principalmente en aquellas áreas donde se presentan explotaciones de carbón o mineral de hierro, en las cuales las actividades de explotación se ven expuestas al contacto del agua con el mineral explotado.

1.6.2. Tratamiento del DAM. Como es bien sabido el DAM representa grandes problemas ambientales dado a su alto potencial contaminante para las fuentes hídricas superficiales o subterráneas, el cual se deriva de sus características de acidez y el contenido de metales pesados, razón por la cual se han venido implementando medias o sistemas de tratamiento que permitan disminuir este potencial contaminante en las aguas tratadas y finalmente realizar el vertimiento de las mismas a las fuentes receptoras.

Según Rao y Finch (1988), existen diferentes métodos para el tratamiento de DAM que permiten la remoción o reducción de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Algunos de estos métodos son:

- Adsorción en interfase líquido-gas: Remoción de sustancias orgánicas tensoactivas.
- Adsorción con carbón activado: Remoción de componentes orgánicos.
- Adsorción con lodo mineral: Remoción de iones metálicos y algunos iones no metálicos. Depende de la composición del lodo.
- Precipitación química: Remoción de metales alcalinos y metales pesados.

- Oxidación biológica: Remoción de materia orgánica biodegradable
- Oxidación química: Transformación de moléculas de alto peso molecular a bajo peso molecular.
- Osmosis inversa: Remoción de electrolitos

Otro de los mecanismos que ha sido materia de investigación y aplicación es la implementación de resinas de intercambio iónico para el tratamiento de DAM, esto debido a la creciente aparición de nuevos polímeros, con características que han venido siendo mejoradas con el paso de los años, producto del desarrollo de procesos de modificación química que permiten la optimización de las propiedades fisicoquímicas de las mismas.

De otra parte, este mismo autor reporta artículos científicos, en los cuales se muestra a las resinas de intercambio iónico, como alternativa para la recuperación de metales en la industria hidrometalúrgica. Los artículos relacionados tratan la siguiente temática:

- Extracción de oro, cobre y zinc, con una resina de intercambio iónico a partir de soluciones de yodo-yoduro.
- Comparación de tres técnicas de separación y recuperación de metales de residuos líquidos (neutralización, electrolisis e intercambio iónico)
- Recuperación de oro de soluciones de cloruro usando la resina selectiva IONAC SR3 del intercambio de ion.

Según Santander, *et. al.* (2011), el Drenaje Acido de Minas (DAM), es uno de los principales problemas ambientales que se presenta en la explotación de carbón

que se realiza en los estados de Santa Catarina y Río Grande do Sul (Brasil), debido a los grandes volúmenes que se generan continuamente. Los métodos de tratamiento de estos residuos principalmente se centran en procesos convencionales como la neutralización con cal y la precipitación de hidróxidos metálicos, así como procesos NF-SL y NF-FAD, los cuales requieren de neutralización con cal, precipitación química de los hidróxidos metálicos, seguida de la floculación de los precipitados y finalmente la separación sólido-líquido mediante sedimentadores de placas o por flotación por aire disuelto.

De acuerdo con lo reportado, estudios comparativos realizados muestran que los métodos NF-SL y NF-FAD presentan eficiencias y porcentajes de remoción similares, los cuales son superiores al 90%, permitiendo obtener agua residual tratada que cumple con los estándares de calidad para su uso como aguas no potables.

No obstante lo anterior, y teniendo en cuenta la magnitud de los impactos ambientales generados por los DAM en las explotaciones de carbón realizadas en Brasil, el autor también afirma que se requiere adelantar investigaciones y desarrollar nuevas tecnologías que permitan eliminar o disminuir dichos impactos, sosteniendo que las mismas se deben orientar en aspectos como la prevención de emisión de DAM, la remediación de DAM, y el tratamiento del DAM, así como la reutilización o reciclaje del agua tratada.

Para el tratamiento de DAM, Noguero (1996), presenta un sistema experimental para el tratamiento integral de este tipo de aguas residuales, el cual consta de tres etapas:

- Precipitación selectiva del hierro
- Síntesis de sulfato potásico a partir de sulfatos contenidos en los DAM

- Recuperación selectiva de metales contenidos en los DAM

El primer paso se realiza ajustando el pH a 3,5, para lo cual se emplea una solución concentrada de NaOH o KOH y burbujeando durante varios días, para de esta manera oxidar y precipitar el hierro. El segundo paso se lleva a cabo en una columna la cual contiene resina de intercambio iónico Lewatit S100 LF en forma potásica, la altura del lecho de la columna es de 18 cm y la elución de metales y regeneración de la resina se realiza con una solución concentrada de KCl o sulfato potásico; una vez realizado este proceso se realiza el lavado de la resina con agua destilada, quedando lista para la siguiente etapa. Finalmente se realiza la recuperación selectiva de los metales, para lo cual se emplea un sistema de tres columnas conectadas en serie, de las cuales, la primera y tercera columna contienen 0,2 g y 1,5 g de resina Lewatit TP 207 y la segunda contiene 1,25 g de resina Lewatit R250-K. Estas son lavadas con agua bidestilada y posteriormente se procede a la elución de los metales con ácido sulfúrico 1M.

Los resultados obtenidos muestran que la remoción de iones, aunque es considerablemente mayor frente a otros procesos de tratamiento ya estudiados, ésta varía dependiendo principalmente de la concentración de iones existentes en las muestras y de las características de cada una de las resinas empleadas en el proceso.

1.6.3. Ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento de DAM. De acuerdo con los métodos anteriormente mencionados, en la tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos así:

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento de DAM.

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Adsorción en interfase líquido-gas	Operación sencilla y el concentrado puede ser recirculado	Requiere equipo de grandes dimensiones
Adsorción en carbón activado	Una sola tapa de remoción de compuestos orgánicos y los adsorbentes pueden ser recuperados	Requiere unidades especiales para la remoción del carbón activado.
Adsorción con lodo mineral	Uso adecuado de los lodos generados en las operaciones	Las cantidades removidas pueden no ser satisfactorias
Precipitación química	Rápida	Requiere control cuidadoso de los reactivos
Oxidación biológica	Potencialmente barato usando un tanque de lodos de origen microbiano	Operación lenta, acondicionamiento posterior requerido
Oxidación química	La remoción de los compuestos orgánicos son oxidados y no tienen problemas de manejo	Costo de capital
Osmosis inversa	Todas las especies catiónicas y aniónicas se remueven en una sola etapa	Problemas de mantenimiento y es necesaria remoción previa de compuestos orgánicos

Fuente: Rao y Finch, 1988.

De acuerdo con la tabla anterior, los diferentes métodos allí descritos presentan una serie de ventajas, y el aprovechamiento de las mismas dependerá principalmente de las características y la composición del DAM.

Como característica común de cada uno de los métodos referenciados se puede observar que la mayoría requiere de procesos previos que eliminen determinados contaminantes o sustancias que puedan afectar el proceso a emplear, adicional a esto, algunos pueden presentar gran inversión de capital para su implementación.

En cuanto a iones sulfato se refiere, Cadornin, Carissimi y Rubio (2007), establecen que la remoción de este tipo de iones de los efluentes mineros, presenta un desafío técnico superior en comparación con los iones metálicos, pues las tecnologías actuales no ofrecen procesos a bajo costo para la eliminación de iones sulfatos que se encuentran en concentraciones entre los 2000 y 2600 ppm, así mismo, establecen que se requieren sustancias químicas como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{PbNO}_3$  o sales de aluminio, en cantidades estequiométricas y a pH fijo de 10,5 para la eliminación de iones sulfato, lo que supone un alto costo de capital por tratarse de tratamientos químicos, que a su vez requieren de un control cuidadoso de los reactivos empleados.

Es de anotar que a nivel internacional existen investigaciones, en las cuales se emplean resinas de intercambio iónico para el tratamiento de Drenajes Ácidos de Minería, aunque éstas no establecen de manera concreta el tipo de minería de la cual provienen estas aguas residuales.

De igual manera se puede observar, que el uso de resinas de intercambio iónico para el tratamiento de aguas residuales producto de la explotación minera de carbón, es una tecnología incipiente y poco estudiada a nivel nacional, desconociéndose ésta como un posible método alternativo o complementario que puede mejorar no solo las condiciones de operación de los frentes de explotación

minera en el país, sino que también puede mejorar las condiciones fisicoquímicas de las aguas residuales derivadas de las actividades de explotación minera, permitiendo que las empresas del sector puedan cumplir con la normatividad ambiental vigente.

## 2. DISEÑO EXPERIMENTAL

### 2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DE MINERÍA

Para el desarrollo de esta etapa se realizaron muestreos de aguas residuales en dos minas ubicadas en los departamentos de Boyacá y Santander respectivamente, teniendo en cuenta que al momento de realización del mismo, cada una de ellas contaba con piscinas encargadas de recibir las aguas residuales de mina y realizar su respectivo tratamiento preliminar, razón por la cual, la toma de muestras se realizó de la siguiente manera: una muestra simple de 18 litros a la entrada de la piscina y otra muestra del mismo tipo y volumen a la salida de la misma.

Una vez realizado este procedimiento, las muestras fueron remitidas al Laboratorio de Análisis Industriales de la Universidad Industrial de Santander para su respectivo análisis fisicoquímico, el cual se centró principalmente en los siguientes parámetros: pH, conductividad, sólidos totales disueltos, aluminio, manganeso, cobre, hierro, zinc y sulfatos.

Cabe señalar que los parámetros fisicoquímicos objeto de análisis se establecieron teniendo en cuenta la siguiente normatividad ambiental, la cual establece el uso de las fuentes hídricas y la calidad del agua para los diferentes usos y vertimientos líquidos, como sigue:

- Decreto-Ley 2811 de 1974, artículos 132, 140 y 147
- Decreto 1541 de 1978, artículos 211, 212, 238

- Decreto 1594 de 1984, artículos 20 y 21
- Decreto 3930 de 2012, artículos 16 y 24

## 2.2. PRUEBA DE RESINA DE INTERCAMBIO

Para la realización de esta prueba se requirió la activación previa de la resina catiónica y aniónica a emplear (Lewatit S100 y Lewatit Monoplus M500 respectivamente), proceso que se llevó a cabo de la siguiente manera:

2.2.1. Preparación de solución de activación de resina Lewatit S100. Para este caso se preparó un litro de solución de HCl al 8%, para lo cual se emplearon 250ml de HCl comercial al 37%, los cuales fueron llevados hasta el volumen final deseado con agua desionizada, realizando agitación mecánica hasta alcanzar disolución completa. Una vez preparada esta solución, ésta fue almacenada para su uso posterior en la activación de la resina.

2.2.2. Preparación de solución de activación de resina Lewatit Monoplus M500. Para la preparación de esta solución se emplearon 80 gramos de NaOH comercial en estado sólido, los cuales fueron disueltos en 920ml de agua desionizada (equivalentes a 920 gramos) mediante agitación mecánica teniendo en cuenta el carácter exotérmico de la reacción. Al igual que en el caso anterior esta solución también fue almacenada para su uso posterior.

2.2.3. Activación de las resinas. Una vez preparadas las soluciones de activación, se tomaron 150 ml de cada una de las resinas a emplear, las cuales fueron introducidas en seis jeringas de 50 ml (tres jeringas para resina catiónica y tres

para resina aniónica). Para el caso de la resina catiónica (Lewatit S100), a cada una de las jeringas se hizo pasar 200 ml de la solución de HCl al 8% previamente preparada. La activación de la resina aniónica (Lewatit Monoplus M500) se realizó empleando 200ml de solución de NaOH al 8% para cada una de las jeringas. El flujo que se empleó para la activación de las resinas fue de 20 ml/min, esto con el propósito de garantizar que el proceso se realizara lentamente. Realizada la activación de las resinas, cada jeringa fue lavada con un volumen de 400 ml de agua desionizada manteniendo el flujo de salida en 20 ml/min. Una vez finalizado este paso se procedió a realizar las pruebas de cada una de las resinas de intercambio.

Para las pruebas de la resina de intercambio se realizaron dos procedimientos: condiciones ambientales y condiciones controladas, así:

2.2.4. Pruebas a condiciones ambientales. Una vez conocidos los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras tomadas en condiciones ambientales, se procedió a realizar el tratamiento de las mismas empleando las resinas de intercambio iónico, con el propósito de determinar de manera cualitativa el funcionamiento, la remoción y la factibilidad del proceso.

Para las pruebas de las muestras a condiciones ambientales, se tomaron tres erlenmeyer que contuvieron diferentes pesos de resina catiónica en un rango entre los 0,5 y 2,5 gramos, a los cuales se le adicionó un volumen de 200 ml de muestra y fueron sometidos a agitación mecánica por un tiempo de 30 minutos. Mientras se llevó a cabo el tratamiento con resina catiónica, se prepararon 3 erlenmeyer los cuales contuvieron diferentes pesos de resina aniónica en un rango entre los 1,5 y los 4,5 gramos.

Finalizado el tratamiento con resina catiónica se separó el líquido y fue transferido a los tres erlenmeyer que contenían la resina aniónica, los cuales fueron sometidos a agitación mecánica durante otros 30 minutos y de esta manera completar el ciclo de tratamiento.

Culminado todo el proceso, se separó el líquido de la resina y se procedió a realizar la medición de los parámetros objeto de análisis previamente establecidos para la caracterización de las muestras, y se analizó de manera cualitativa el comportamiento del proceso y la remoción de analitos.

Este procedimiento fue realizado por triplicado con el propósito de verificar el comportamiento de los resultados obtenidos, la concordancia entre los mismos y así poder establecer el comportamiento del proceso.

2.2.5. Pruebas a condiciones controladas. Con el propósito de conocer el comportamiento de la resina a condiciones extremas, se realizaron pruebas a condiciones controladas, las cuales consistieron principalmente en la preparación de 15 litros de una solución patrón que contuvo concentraciones de los analitos (cationes) de interés 10 veces mayores a las reportadas en los análisis preliminares realizados a las muestras tomadas a condiciones ambientales.

Para la elaboración de los 15 litros de la solución patrón, se emplearon las sustancias y cantidades reportadas en la tabla 3, así:

Tabla 3. Peso de sustancias para preparación de solución patrón.

Sustancia	Peso (g)
Sulfato de Cobre	2.063
Sulfato de Zinc	0.178

Sustancia	Peso (g)
Sulfato de Aluminio	0.951
Sulfato de Hierro	27.907
Sulfato de Manganeso	1.676

Fuente: El autor, 2013.

Una vez preparada la solución patrón a emplear, su valor de pH fue ajustado a 2.5 unidades para simular las condiciones de acidez que generalmente presentan los DAM. Finalmente la solución patrón se dejó en reposo por 8 horas para permitir la disolución completa de las sustancias empleadas y la estabilización del pH en todo el sistema. Una vez se alcanzó la estabilidad del sistema, se procedió a realizar el tratamiento de la solución patrón, para lo cual se emplearon las resinas de intercambio iónico previamente establecidas para este propósito.

Para el tratamiento con resina catiónica se tomaron diferentes pesos de resina en un rango de valores comprendidos entre los 0,5 y los 9,0 gramos, estos fueron introducidos en 7 erlenmeyer diferentes, a los cuales se incorporaron 200ml de solución patrón y fueron sometidos a agitación mecánica durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo, el líquido de cada uno de los recipientes fue separado de la resina y se realizó la medición de la concentración de los cationes presentes en cada una de las muestras tratadas. El líquido sobrante se empleó para el tratamiento con resina aniónica.

Para el tratamiento con resina aniónica se prepararon 7 erlenmeyer que contuvieron diferentes pesos de resina aniónica en un rango entre los 2,0 y los 7,5 gramos, a los cuales fue incorporado el líquido sobrante del tratamiento con resina catiónica. Los erlenmeyer fueron sometidos a agitación mecánica durante 30 minutos. Concluido el tratamiento se procedió a realizar la medición de la concentración de sulfatos en las muestras tratadas. Finalmente se procedió a

analizar el comportamiento del proceso y la remoción que se alcanzó durante el mismo.

Este procedimiento fue realizado por triplicado con el propósito de verificar el comportamiento de los resultados obtenidos, la concordancia entre los mismos y así poder establecer el comportamiento del proceso.

### 2.3. PRUEBAS PRELIMINARES EN COLUMNA PARA RESINA CATIONICA

Previo a la construcción de la columna se preparó nuevamente un volumen de 15L de solución patrón bajo las mismas condiciones que fueron establecidas para las pruebas de la resina de intercambio iónico a condiciones controladas.

Para la construcción de dicho sistema se empleó una columna de PVC cuyo diámetro interno fue de 1 pulgada y tuvo una altura de lecho de 80 cm. tendrá una altura de lecho de 80 cm. La resina fue introducida a la columna empleando agua desionizada hasta que se obtuvo la altura establecida. Una vez realizado el empacado de la columna se procedió a la eliminación de burbujas de aire ubicadas dentro de la misma.

Una vez concluido el empacado se procedió a la activación de la resina, para lo cual se preparó 1L de solución de HCl al 8% de acuerdo con el procedimiento previamente establecido, la cual se hizo pasar a través de la columna con un flujo de salida de 20ml/min. Una vez concluido este paso, se procedió a realizar el lavado de la columna, para lo cual se emplearon 2L de agua desionizada manteniendo constante el flujo de salida establecido.

Una vez empacada y activada la columna, se procedió a conectar la misma a una bomba impulsora de 1/2 HP, la cual se encargó de enviar el líquido desde el recipiente contenedor hasta la cabeza de la columna con un flujo constante de 100mL/min. Durante el proceso se tomaron muestras cada 10 minutos, las cuales fueron empleadas posteriormente para determinar la curva de saturación de la columna y establecer el grado de remoción de cationes alcanzado por la misma.

#### 2.4. DETERMINACIÓN DE CINÉTICA DEL PROCESO

Para la determinación de la cinética del tratamiento realizado en la columna se emplearon los siguientes modelos matemáticos, teniendo en cuenta que estos son los más estudiados y que presentan mayor aplicabilidad en este tipo de procesos:

- a. Isoterma de adsorción de Freundlich
- b. Isoterma de adsorción de Langmuir

Para cada modelo se tomaron los datos obtenidos del tratamiento en columna y fueron sometidos al respectivo tratamiento matemático de acuerdo con las expresiones matemáticas establecidas para el análisis. Una vez concluido esto, se procedió a construir las respectivas isotermas de adsorción, las cuales fueron linealizadas y finalmente se determinó la cinética del proceso.

La medición de todos los parámetros fisicoquímicos, relacionados con concentraciones de los analitos presentes en las muestras y que fueron objeto de este estudio, se realizó empleando un Espectrofotómetro DR-2800 marca HACH, el cual cuenta con la ficha técnica mostrada en la tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de Espectrofotómetro HACH DR-2800.

CARACTERISTICA	DESCRIPCION
Modo Operativo	Transmitancia (%), absorbancia y concentración
Fuente de luz	Lámpara de tungsteno en atmosfera gaseosa (visible)
Rango de longitud de onda	340-900 nm
precisión de longitud de onda	±1,5 nm
Reproducibilidad de longitud de onda	<0,1 nm
Resolución de longitud de onda	1 nm
calibración de longitud de onda	Automática al inicio
Selección de longitud de onda	Automática, mediante selección del método
Ancho de banda espectral	< 8nm
Rango de medida fotométrico	±3,0 Abs en el rango de longitud de onda 340-900 nm
Precisión fotométrica	0,005 Abs a 0,0 - 0,5 Abs 1% a 0,50 - 2,0 Abs
Linealidad fotométrica	0,5% a £ 2Abs £ 1% a > 2 Abs con vidrio neutro a 546 nm
Luz difusa	< 0,2% T a 340 nm con filtro KV450/3 < 0,1% T a 340 nm con NaNO2
almacenamiento de datos	500 valores medidos
Programas del usuario	50 programas

Fuente: hach-latinoamerica.com

Cabe señalar que para los parámetros de interés el espectrofotómetro HACH DR-2800 cuenta con métodos pre programados para tal fin y la calibración de lámparas y métodos se realiza de manera automática.

Para el caso de la medición de parámetros como pH, conductividad y sólidos, se empleó un equipo multiparámetro marca HANNA, referencia HI991301 con sonda HI1288, los cuales presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones técnicas equipo multiparámetro HANNA HI991301 y sonda HI1288.

CARACTERISTICA	DESCRIPCION
Rango	pH: 0,00 a 14,00 pH
	Conductividad Eléctrica: 0 a 3999 $\mu$ S/cm
	Sólidos Disueltos Totales: 0 a 2000 ppm (mg/L)
	Temperatura: 0,0 a 60,0°C
Resolución	pH: 0,01 pH
	Conductividad Eléctrica: 1 $\mu$ S/cm
	Sólidos Disueltos Totales: 1 ppm (mg/L)
	Temperatura: 0,1°C
Precisión (a 20°C)	pH: $\pm$ 0,01 pH
	Conductividad Eléctrica: $\pm$ 2% F.R.
	Sólidos Disueltos Totales: $\pm$ 2% F.R.
	Temperatura: $\pm$ 0,5°C
Sonda	HI 1288, pH/CE/TDS/T, conector DIN, cable 1m

Fuente: hannacolombia.com

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DE MINERÍA

La selección de los parámetros fisicoquímicos de interés, se realizó teniendo en cuenta principalmente la normatividad ambiental encargada de la regulación, el control y monitoreo de la calidad del agua en fuentes hídricas superficiales, la cual establece las sustancias de interés sanitario y la concentración máxima permisible de estas, de acuerdo con la destinación o uso final de la fuente hídrica.

De acuerdo con lo anterior se establecieron como objeto de análisis los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, sólidos totales, aluminio, manganeso, hierro, zinc y sulfatos. Los cuales fueron analizados para las muestras tomadas en las minas de Santander y Boyacá; los resultados de estas pruebas se reportan en las tablas 6 y 7. Es de anotar, que la identificación y ubicación geográfica exacta de las mismas ha sido protegida por solicitud expresa del director operativo de la empresa a la cual pertenecen estas minas.

Tabla 6. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander

DAM MINA SANTANDER							
pH (unidades de pH)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Sólidos Totales(mg/L)	Concentración (mg/L)				
			Al	Mn	Fe	Zn	Sulfatos
2,75	2810	3052	<L.D	0,13	32,23	0,16	2631

Fuente: Laboratorio químico de consultas industriales UIS, 2012.

De acuerdo con la tabla anterior, se puede observar que el DAM proveniente de la mina situada en el departamento de Santander, presentó un valor de pH bajo (2,75 unidades de pH), lo cual permitió inferir la presencia de ácido sulfúrico en el mismo, situación que pudo ser confirmada, debido a la elevada concentración de iones sulfato (2631 mg/L) identificados en la muestra analizada.

De otra parte, el DAM presentó valores de conductividad eléctrica elevados (2810  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo que permitió corroborar la existencia de iones disueltos en el mismo, siendo los más representativos para este caso, los iones de hierro y sulfato, aunque también se evidenció, en menor proporción, la presencia de otros iones de interés como: zinc, manganeso (0,16 y 0,13 mg/L respectivamente) y aluminio, siendo este último el que presentó la menor concentración, encontrándose ésta por debajo del límite de detección del método empleado para su identificación (Absorción Atómica - AA). También se pudo observar la presencia de una elevada concentración de sólidos totales en la muestra, correspondiente a 3052 mg/L.

Tabla 7. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá

DAM MINA BOYACÁ							
pH (unidades de pH)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Sólidos Totales (mg/L)	Concentración (mg/L)				
			Al	Mn	Fe	Zn	Sulfatos
6,75	2070	1960	<L.D	2,49	37,3	0,27	1219,5

Fuente: Laboratorio químico de consultas industriales UIS, 2012.

Para el caso del DAM obtenido en la mina ubicada en el departamento de Boyacá, se pudo observar que presenta un valor de pH cercano a 7 y una concentración de iones sulfato correspondiente a 1219,5 mg/L, la cual es menor que en el caso

anterior, no obstante, no se descartó la posible existencia de ácido sulfúrico en la muestra.

De otra parte, el DAM presentó valores de conductividad elevados y similares a los obtenidos en el caso anterior (2070  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual permitió confirmar la existencia de iones disueltos, y su representatividad presenta el mismo comportamiento del DAM de la mina ubicada en el departamento de Santander, siendo el hierro (37,3 mg/L) y los sulfatos (1219,5 mg/L) los iones que presentaron concentraciones la más elevadas, comparados con los demás analitos de interés que fueron analizados. También se evidenció la presencia de iones de zinc (0,27 mg/L), manganeso (2,49 mg/L) y aluminio, siendo este último (al igual que en el caso anterior) el analito que presentó la menor concentración, encontrándose ésta por debajo del límite de detección del método empleado para su identificación (AA). De igual manera se observó una elevada concentración de sólidos totales (1960 mg/L), aunque esta es menor que en el caso anterior.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 20 del Decreto 1594 de 1984, se consideran sustancias de interés sanitario, entre otras, aquellas que contienen: arsénico, plomo, bario, cobre, cromo, plata, níquel, berilio, zinc. De otra parte, este mismo documento determina los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso hídrico para consumo humano, de los cuales se destacan principalmente: pH entre 5.0 y 9.0 unidades de pH, y concentración de sulfatos máximo de 400 mg/L. De igual manera establece los criterios para destinación del recurso hídrico para uso agrícola, entre los cuales se destacan: concentración de zinc máximo de 2.0 mg/L, concentración de hierro máximo de 5.0 mg/L, concentración de manganeso máximo de 2.0 mg/L, pH entre 4.5 y 9.0 unidades de pH.

En concordancia con los lineamientos de la autoridad ambiental y los resultados obtenidos del análisis de las muestras de DAM tomadas en las minas de Santander y Boyacá, se pudo observar que estos contienen sustancias de interés sanitario, y algunas de estas se encuentran en concentraciones superiores al máximo permitido por la normatividad ambiental, lo cual permitió constatar que estos DAM son potenciales agentes de contaminación de las fuentes hídricas superficiales.

Adicionalmente, dadas la concentraciones de sulfatos que fueron identificadas en las muestras analizadas, se estimó, dadas las condiciones bajo las cuales se forman los DAM, que los mantos de carbón existentes en estas zonas del país, pueden presentar altos contenidos de azufre, así mismo, se pudo establecer que se requieren análisis de laboratorio más profundos que permitan determinar claramente el contenido de esta sustancia en el mineral.

## 3.2. PRUEBA DE RESINA DE INTERCAMBIO

3.2.1. Prueba de resina a condiciones ambientales. Para este proceso, se emplearon las resinas de intercambio iónico Lewatit S100 y Lewatit Monoplus M500 previamente activadas. Las muestras empleadas para esta prueba correspondieron a los DAM provenientes de las minas ubicadas en los departamentos de Santander y Boyacá, las cuales fueron tratadas de acuerdo con la metodología diseñada, obteniendo los resultados en las tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Análisis 1.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)					Tiempo (min)
					Al	Mn	Fe	Zn	SULFATOS	
0,52	2,55	11,43	1588	794	1,8	10	2,0	3,2	705	60
1,53	3,51	11,58	1516	758	0,0	10	1,8	2,8	0,0	
2,49	4,76	11,58	1443	722	0,0	10	2,2	3,0	0,0	

Fuente: El autor, 2013.

Tabla 9. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Análisis 2.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)					Tiempo (min)
					Al	Mn	Fe	Zn	SULFATOS	
0,52	2,55	11,44	1592	796	1,7	10	1,8	2,8	695	60
1,52	3,50	11,59	1520	760	0,0	11	2,2	3,2	0,0	
2,49	4,80	11,57	1443	722	0,0	10	2,0	3,2	0,0	

Fuente: El autor, 2013.

Tabla 10. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Análisis 3.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)					Tiempo (min)
					Al	Mn	Fe	Zn	SULFATOS	
0,52	2,56	11,43	1590	795	1,9	11	2,2	3,0	700	60
1,55	3,50	11,53	1518	759	0,0	10	2,0	3,0	0,0	
2,48	4,79	11,58	1446	723	0,0	11	1,8	2,8	0,0	

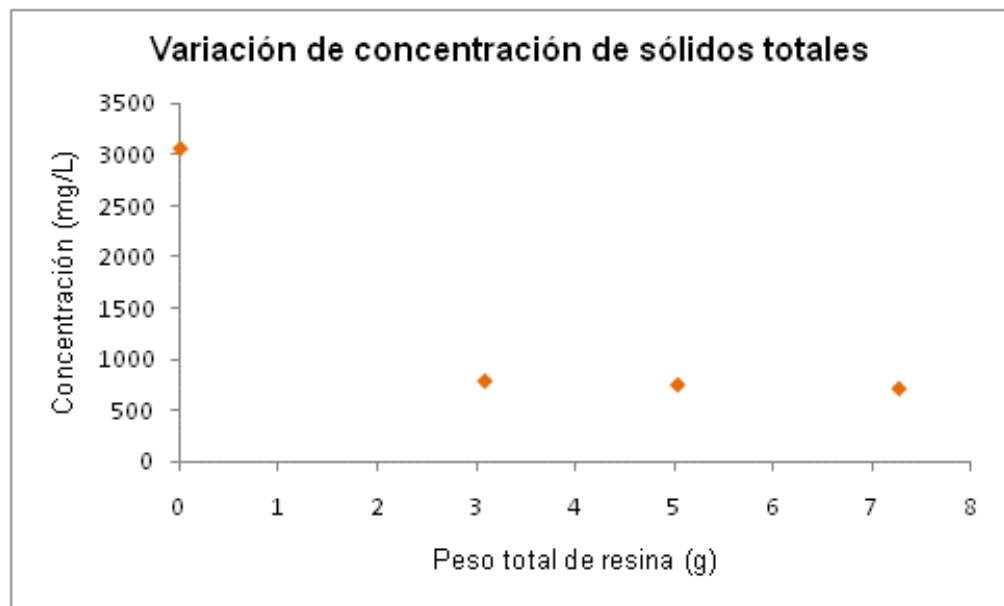
Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados obtenidos en los respectivos análisis post-tratamiento fueron promediados y empleados en el análisis correspondiente del proceso realizado, lo cuales se registran en la tabla 11.

Tabla 11. Análisis fisicoquímico DAM mina Santander tratado con resinas de intercambio. Valores promedio.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad (µS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)					Tiempo (min)
					Al	Mn	Fe	Zn	SULFATOS	
0,53	2,55	11,44	1590	795	1,8	10	2,0	3,0	700	60
1,53	3,50	11,58	1518	759	0,0	10	2,0	3,0	0,0	
2,49	4,78	11,58	1444	722	0,0	10	2,0	3,0	0,0	

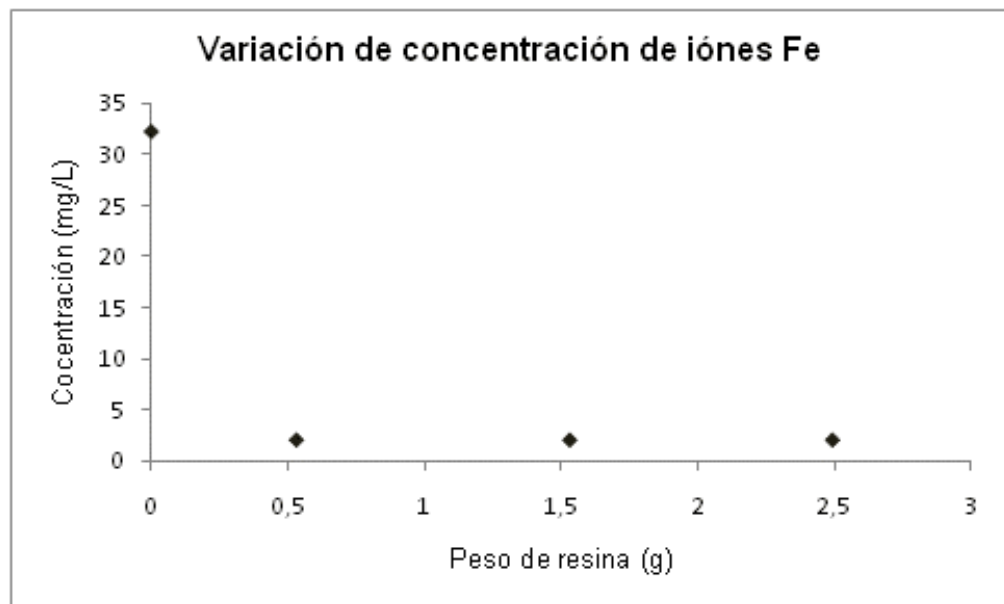
Fuente: El autor, 2013.

Figura 3. Variación de concentración de sólidos totales presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento.



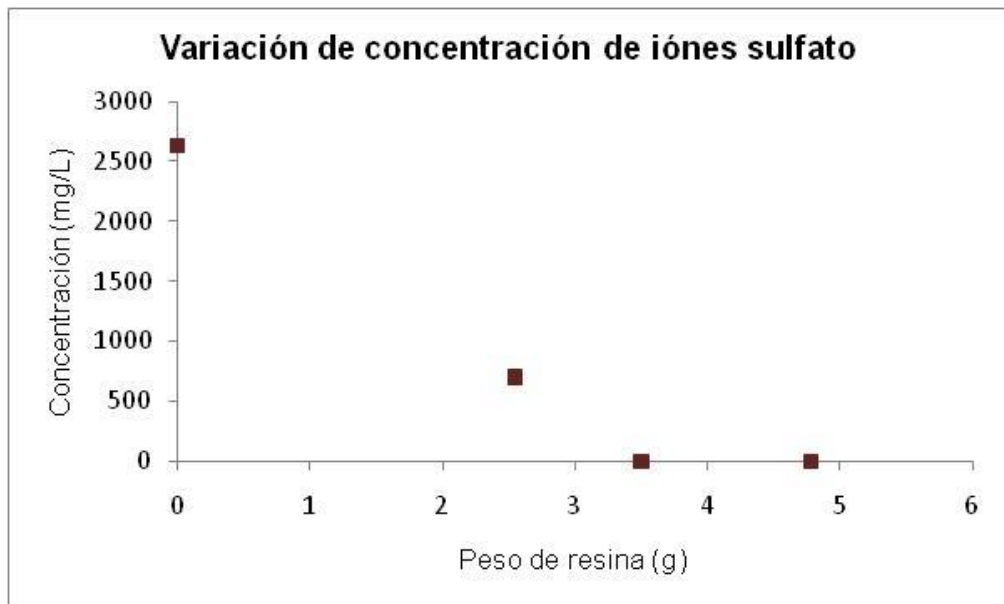
Fuente: El autor, 2013.

Figura 4. Variación de concentración de iones Fe presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

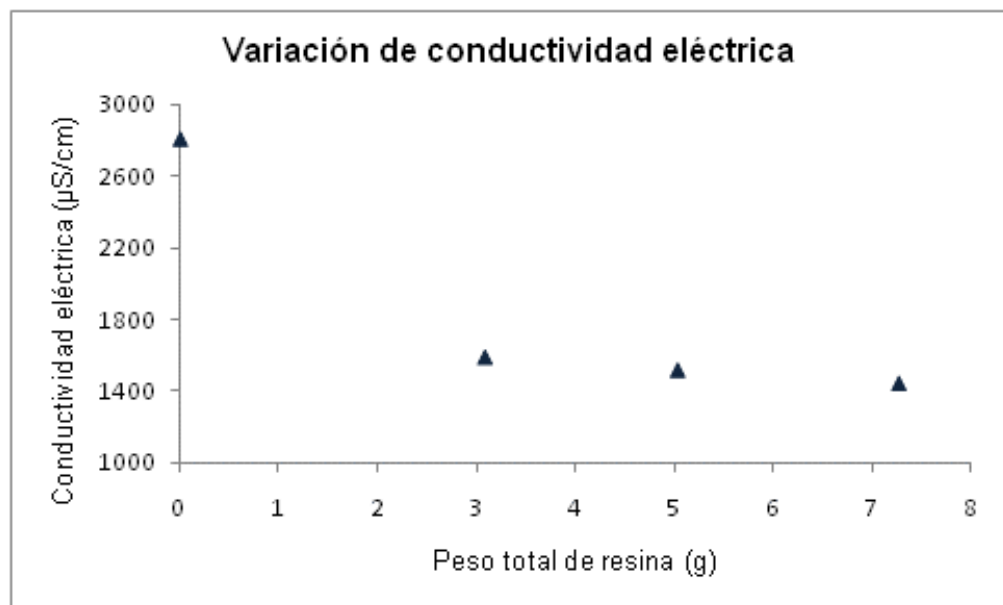
Figura 5. Variación de concentración de iones sulfato presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

Como se puede observar en las figuras 3 a 5, el DAM una vez tratado con las resinas de intercambio iónico presentó un descenso en la concentración de algunas sustancias como los sólidos totales, hierro y sulfatos, comparado con los valores reportados en la caracterización inicial del DAM; este descenso está relacionado principalmente con la cantidad de resina empleada en el tratamiento, pues a mayor cantidad de resina empleada para el tratamiento, mayor cantidad de sitio activos posibles para realizar el intercambio iónico.

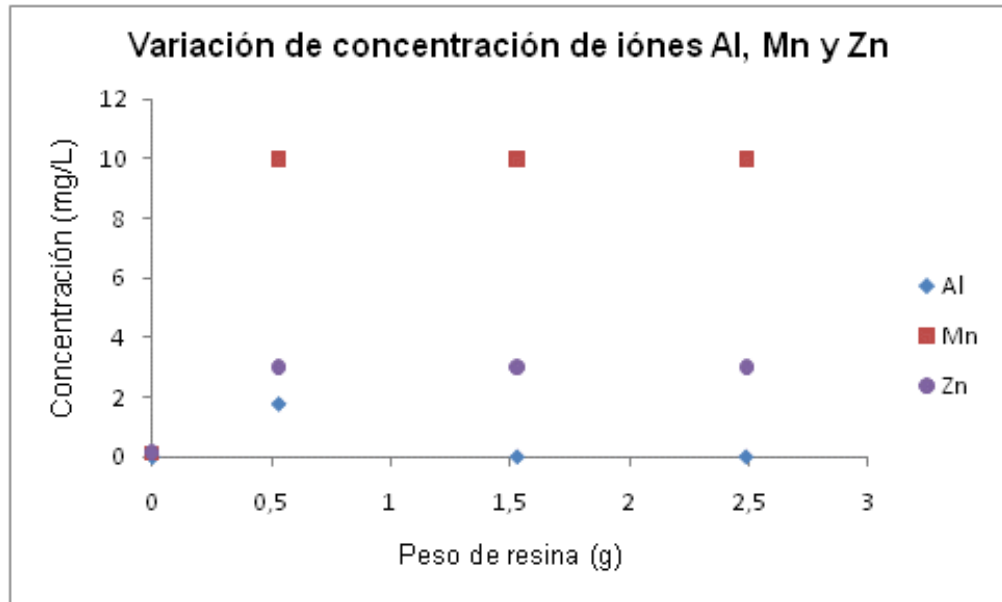
Figura 6. Variación de conductividad eléctrica en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

Como lo señala la figura 6, también se pudo observar un descenso en la conductividad eléctrica, la cual se encuentra relacionada con la concentración de sólidos y la concentración de iones en solución que se encuentran en la muestra tratada. Esto debido a que el proceso de agitación mecánica, permite mejorar la solubilidad de algunos de los sólidos presentes en la muestra, permitiendo a su vez el intercambio iónico.

Figura 7. Variación de concentración de cationes presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

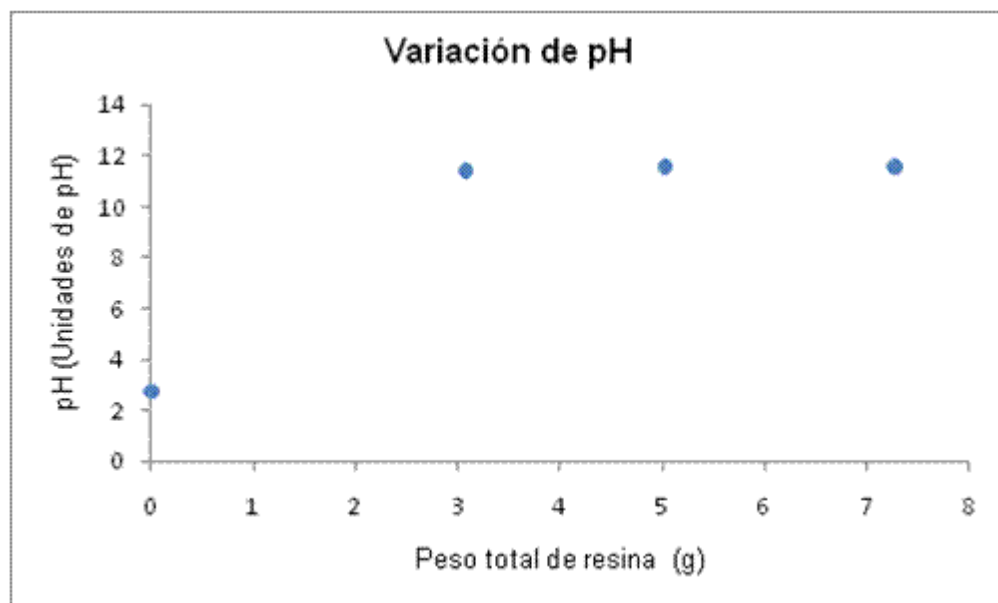
De acuerdo con la figura 7, para el caso del manganeso y el zinc, se observaron dos fenómenos importantes, el primero de ellos es que una vez finalizado el tratamiento la concentración los mismos fue mayor que la reportada en las pruebas iniciales realizadas para la caracterización del DAM, lo cual podría ser resultado de la agitación realizada durante el proceso, ya que ésta mejora la solubilidad de las sustancias sólidas presentes en la muestra. El segundo fenómeno está relacionado con la invariabilidad de la concentración medida post-tratamiento, lo cual se relaciona directamente con la resina, pues en el momento de realizar el intercambio iónico esta puede presentar preferencia y afinidad hacia otros iones metálicos diferentes al manganeso.

Para el caso del aluminio se presentó un fenómeno similar al observado para el manganeso y el zinc, pues en todas las pruebas de tratamiento en las que se empleó la menor cantidad de resina Lewatit S100, la concentración medida post-tratamiento fue mayor que la concentración inicial reportada en la caracterización

del DAM, lo cual puede estar asociado con el proceso de agitación realizada durante el proceso, ya que éste mejora la solubilidad de las sustancias sólidas presentes en la muestra. No obstante, con el posterior aumento de las cantidades de resina, la concentración de aluminio en la muestra tratada se redujo a cero.

Dadas las especificaciones técnicas de la resina Lewatit S100, las condiciones de almacenamiento de la misma y la información suministrada por el fabricante, se descartó la contaminación de la resina empleada como posible explicación a los fenómenos observados.

Figura 8. Variación de concentración de cationes presentes en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

De otra parte se observó, de acuerdo con la figura 8, un aumento en el pH final de la muestra tratada, el cual se debe a la acción de la resina Lewatit Monoplus M500, la cual se encarga de realizar el intercambio entre los iones  $\text{SO}_4^{-2}$  existentes en la muestra problema y los iones  $\text{OH}^-$  presentes en los sitios activos de la resina. Dado que la carga neta del ion sulfato es -2, se requiere la liberación

de dos iones OH<sup>-</sup> por cada ión sulfato intercambiado, razón por la cual, al final del tratamiento se obtiene un exceso en la concentración de iones hidroxilo, lo cual se refleja en el subsecuente aumento del pH de la muestra tratada.

En cuanto a los análisis post-tratamiento que fueron realizados al DAM proveniente de la mina Boyacá, los resultados obtenidos se reportan en las tablas 12 a 14 así:

Tabla 12. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Análisis 1

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)						Tiempo (min)
					Al	Mn	Cu	Fe	Zn	SULFATOS	
0,55	2,48	11,71	2477	1239	2,3	5,0	1,5	2,1	2,5	100	60
1,49	3,53	11,84	2464	1232	0,3	5,1	0,5	1,5	1,9	52	
2,53	4,70	11,90	2379	1190	0,3	5,1	0,5	1,1	1,1	52	

Fuente: El autor, 2013.

Tabla 13. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Análisis 2

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)						Tiempo (min)
					Al	Mn	Cu	Fe	Zn	SULFATOS	
0,51	2,51	11,71	2476	1238	1,9	5,0	1,6	1,8	2,8	100	60
1,53	3,47	11,80	2468	1234	0,1	5,0	0,5	1,5	2,1	49	
2,47	4,69	11,91	2577	1189	0,1	5,0	0,5	1,0	0,9	49	

Fuente: El autor, 2013.

Tabla 14. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Análisis 3

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)						Tiempo (min)
					Al	Mn	Cu	Fe	Zn	SULFATOS	
0,53	2,51	11,73	2479	1240	2,1	5,1	1,5	2,1	2,3	101	60
1,51	3,53	11,81	2465	1233	0,3	5,0	0,6	1,6	2,1	50	
2,48	4,73	11,95	2376	1188	0,3	5,0	0,5	1,0	1,0	50	

Fuente: El autor, 2013.

Al igual que para el caso del tratamiento del DAM de la mina de Santander, los resultados obtenidos de las mediciones post-tratamiento, también fueron promediados y empleados en el análisis respectivo. Ver tabla 15.

Tabla 15. Análisis fisicoquímico DAM mina Boyacá tratado con resinas de intercambio. Valores promedio.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Sólidos Totales (mg/L)	CONCENTRACION (mg/L)						Tiempo (min)
					Al	Mn	Cu	Fe	Zn	SULFATOS	
0,53	2,5	11,72	2477	1239	2,1	5,0	1,5	2,0	2,5	100	60
1,51	3,51	11,82	2466	1232	0,2	5,0	0,5	1,5	2,0	50	
2,49	4,71	11,92	2377	1189	0,2	5,0	0,5	1,0	1,0	50	

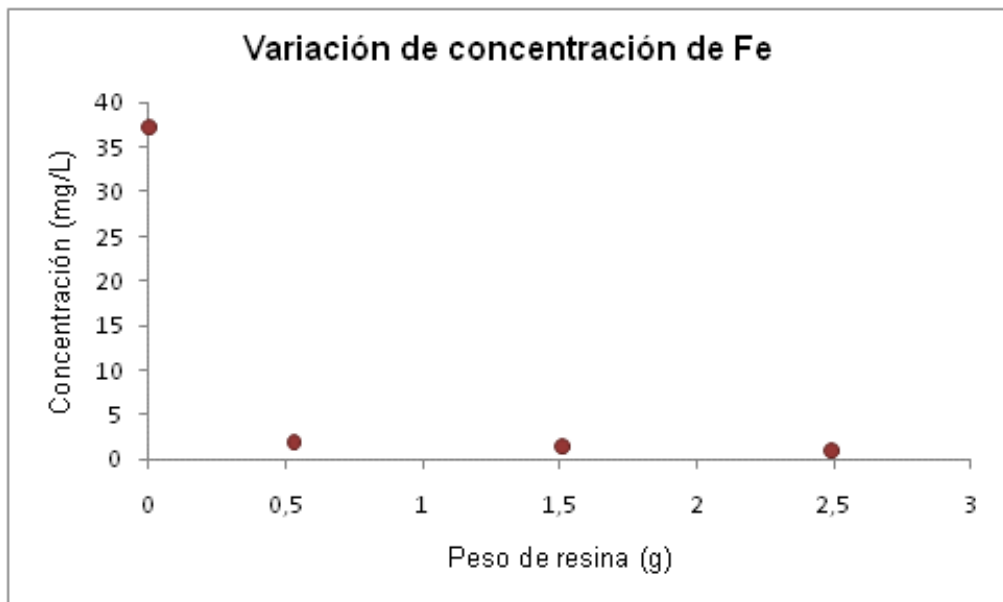
Fuente: El autor, 2013.

Figura 9. Variación de concentración de sólidos totales presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento



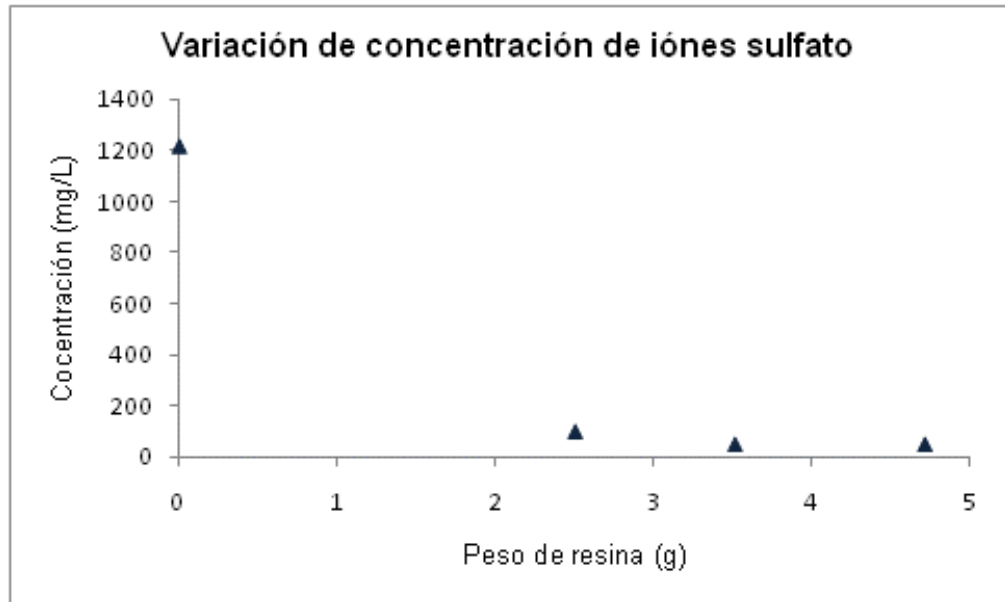
Fuente: El autor, 2013.

Figura 10. Variación de concentración de iones Fe presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

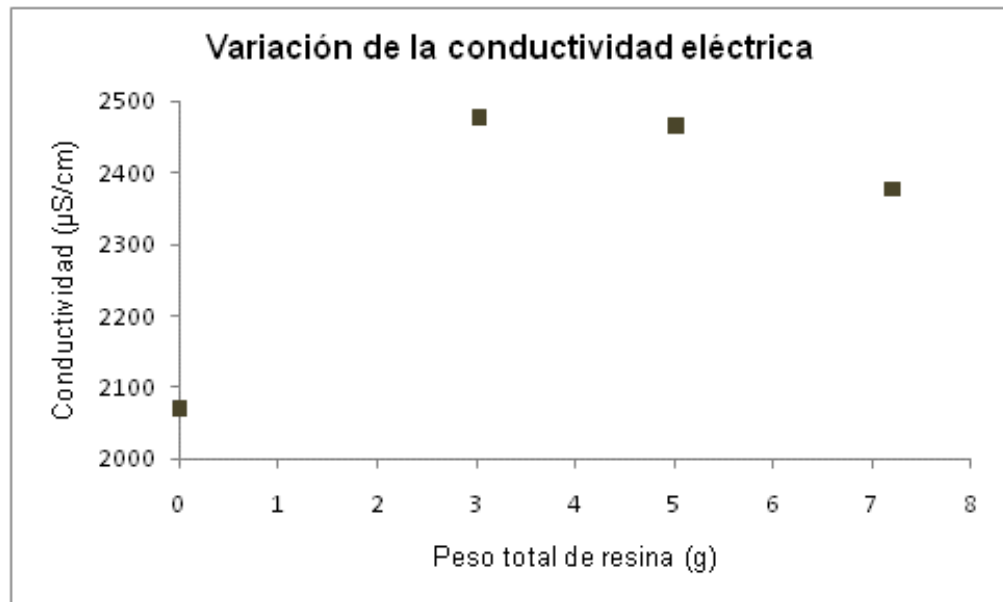
Figura 11. Variación de concentración de iones sulfato presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

Como lo muestran las figuras 9 a 11, el DAM de la mina Boyacá, una vez tratado con las resinas de intercambio iónico, presentó un comportamiento similar al DAM de la mina Santander post-tratamiento, toda vez que también se evidenció un descenso en la concentración de sustancias como los sólidos totales, hierro y sulfatos; este descenso está relacionado principalmente con la cantidad de resina empleada en el tratamiento, pues a mayor cantidad de resina empleada para el tratamiento, mayor cantidad de sitio activos posibles para realizar el intercambio iónico.

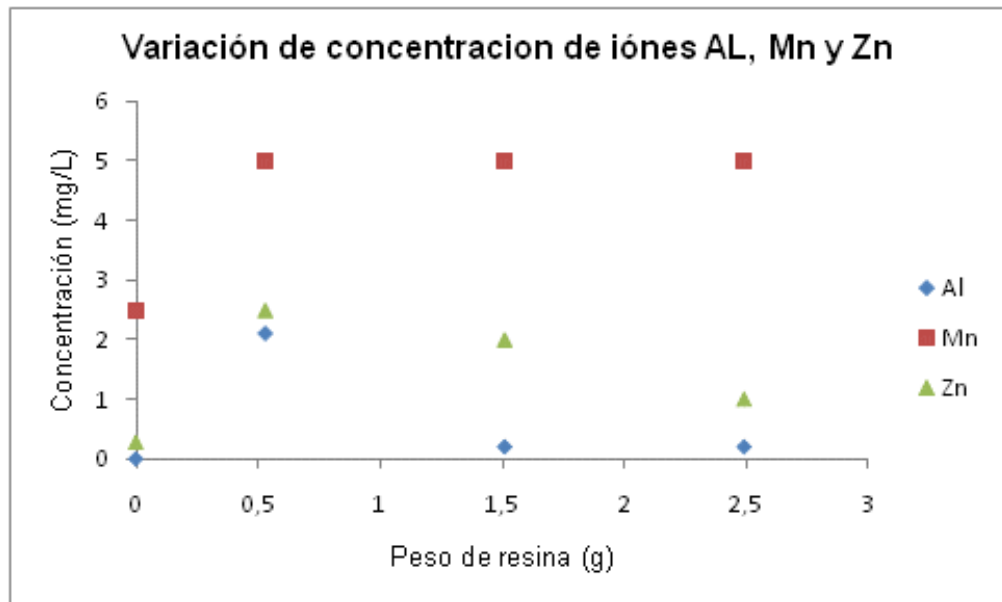
Figura 12. Variación de conductividad eléctrica en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

Como lo señala la figura 12, también se pudo observar un descenso en la conductividad eléctrica, la cual se encuentra relacionada con la concentración de sólidos y la concentración de iones en solución que se encuentran en la muestra tratada. No obstante, se puede apreciar una diferencia entre el valor inicial medido en la caracterización inicial de la muestra y lo reportado durante la medición post-tratamiento; esta situación se pudo presentar debido a que el proceso de agitación mecánica, pues éste permite mejorar la solubilidad de algunos de los sólidos presentes en la muestra, permitiendo un cambio en la concentración inicial de los analitos de interés, afectando a su vez el proceso de intercambio iónico.

Figura 13. Variación de concentración de cationes presentes en la muestra de DAM mina Boyacá post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

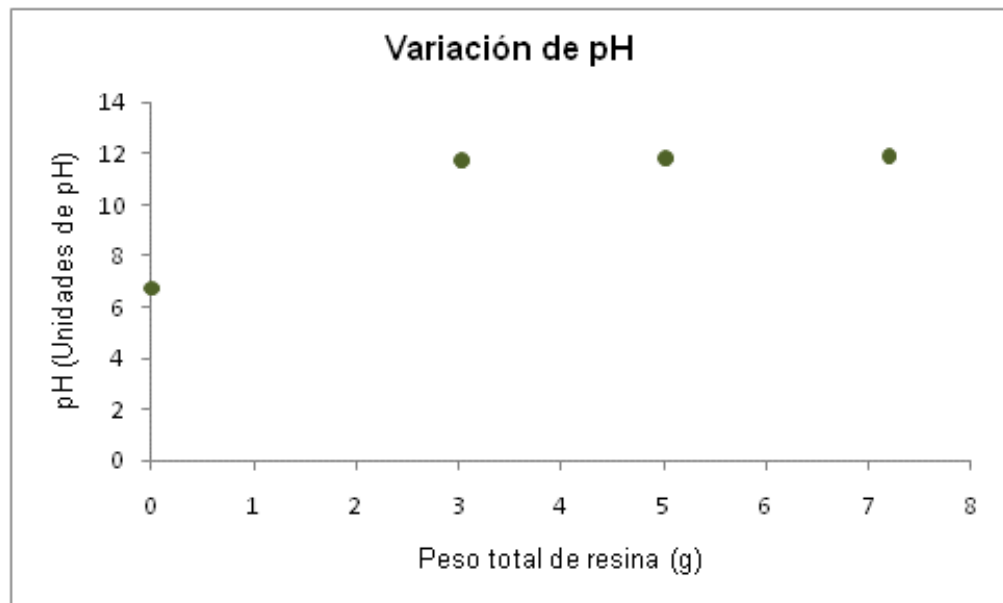
Para el caso del aluminio, el manganeso y el zinc, como lo indica la figura 13, se observó un fenómeno importante relacionado con la concentración de estos analitos, toda vez que el resultado post-tratamiento, empleando diferentes cantidades de resina, presentó valores superiores a los reportados en la caracterización inicial del DAM, lo cual podría ser resultado de la agitación realizada durante el proceso, ya que ésta mejora la solubilidad de las sustancias sólidas presentes en la muestra. No obstante lo anterior, también se registró un descenso gradual en la concentración de estos iones a medida que se variaba la cantidad de resina empleada

Un segundo fenómeno de interés, relacionado con la concentración de manganeso que se presentó durante el proceso, estuvo con la invariabilidad de dicha concentración a lo largo del proceso, la cual se presenta de manera independiente con la cantidad de resina empleada; esto puede derivarse del mismo intercambio y las características de la resina, pues la resina puede

presentar preferencia y afinidad por otros iones metálicos diferentes al manganeso, afectando de esta manera el proceso de intercambio para este ión en particular.

Dadas las especificaciones técnicas de la resina Lewatit S100, las condiciones de almacenamiento de la misma y la información suministrada por el fabricante, se descartó la contaminación de la resina empleada como posible explicación a los fenómenos anteriormente descritos.

Figura 14. Variación de pH en la muestra de DAM mina Santander post-tratamiento



Fuente: El autor, 2013.

Al igual que para el DAM de la mina Santander, en este caso también se observó un aumento en el pH final de la muestra tratada (ver figura 14) y su explicación se deriva del mecanismo de acción de la resina Lewatit Monoplus M500, ya que ésta requiere la liberación de dos iones  $\text{OH}^-$  por cada ión  $\text{SO}_4^{2-}$  intercambiado, motivo por el cual al final del tratamiento se tendrá un exceso en la concentración de

iones OH<sup>-</sup>, produciendo un aumento en el pH final, tal como se observó una vez finalizado el tratamiento realizado.

3.2.2. Prueba de resina a condiciones controladas. Una vez culminadas las pruebas a condiciones ambientales, y con el propósito de conocer el comportamiento de las resinas empleadas bajo condiciones extremas, se emplearon 15L una solución patrón, la cual contuvo concentraciones de los analitos de interés 10 veces superiores a la concentración inicial existente en el DAM de la mina Santander, la cual fue sometida al respectivo tratamiento, obteniendo los resultados reportados en las tablas 16 a 18.

Tabla 16. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Análisis 1.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Sólidos totales (mg/L)	CONCENTRACIÓN (mg/L)					Tiempo
					Al	Mn	Fe	Zn	Sulfatos	
0	0	2,54	8678	4339	10	45	324	14,1	15720	0 minutos
0,51	0,75	2,15	7011	3510	7,32	35,7	255	10,5	4528	60 minutos
1,48	1,53	1,87	5109	2554	4,87	18,7	160	5,8	1295	
2,05	2,91	2,16	4263	2130	1,23	8,2	84	3,7	733	
2,32	3,70	6,73	2836	1416	0,098	2,5	9,8	1,1	188	
4,18	4,63	9,51	1415	708	0,032	2,0	2,9	0,3	14,9	
4,96	6,51	11,11	919	463	0,018	1,2	1,0	0,1	1,0	
9,35	7,54	11,26	903	453	0,007	0,4	0,9	0,1	1,0	

Fuente: El autor, 2013.

Tabla 17. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Análisis 2.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Sólidos totales (mg/L)	CONCENTRACIÓN (mg/L)					Tiempo
					Al	Mn	Fe	Zn	Sulfatos	
0	0	2,54	8678	4341	10	45	324	14,1	15720	0 minutos
0,48	0,74	2,16	7009	3502	7,35	39,0	258	10,9	4523	60 minutos
1,49	1,54	1,87	5108	2557	4,90	19,3	167	6,0	1294	
2,06	2,89	2,17	4270	2138	1,19	8,0	81	3,7	733	
2,33	3,67	6,75	2831	1415	0,095	2,6	9,8	1,2	189	
4,17	4,65	9,49	1409	709	0,037	1,9	3,1	0,2	15,2	
5,01	6,52	11,11	923	459	0,016	1,1	0,9	0,1	1,0	
9,33	7,54	11,23	899	449	0,009	0,5	0,9	0,1	1,0	

Fuente: El autor, 2013.

Tabla 18. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Análisis 3.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Sólidos totales (mg/L)	CONCENTRACIÓN (mg/L)					Tiempo
					Al	Mn	Fe	Zn	Sulfatos	
0	0	2,54	8678	4338	10	45	324	13,9	15720	0 minutos
0,50	0,74	2,13	7015	3507	7,33	36,4	259	10,6	4528	60 minutos
1,49	1,51	1,86	5112	2553	4,91	19,1	161	5,7	1299	
2,05	2,92	2,14	4268	2135	1,20	8,3	81	3,8	732	
2,33	3,70	6,71	2833	1419	0,094	2,0	10,2	1,4	188	
4,18	4,62	9,52	1413	702	0,037	2,2	2,9	0,3	14,9	
4,98	6,48	11,08	920	457	0,015	1,1	1,1	0,1	1,1	
9,38	7,54	11,28	905	450	0,006	0,5	1,1	0,1	1,1	

Fuente: El autor, 2013.

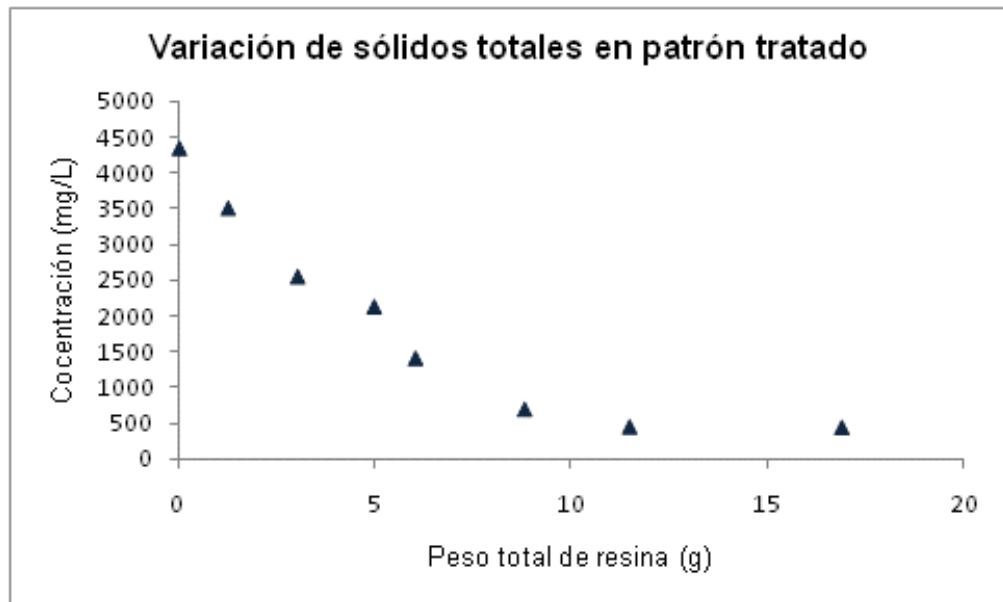
Al igual que en los casos anteriores, los resultados obtenidos de las mediciones post-tratamiento, también fueron promediados y empleados en el análisis respectivo. Ver tabla 19.

Tabla 19. Análisis fisicoquímico patrón tratado con resinas de intercambio. Valores promedio.

Resina catiónica (g)	Resina aniónica (g)	pH (U de pH)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Sólidos totales (mg/L)	CONCENTRACIÓN (mg/L)					Tiempo
					Al	Mn	Fe	Zn	Sulfatos	
0	0	2,54	8678	4339	10	45	324	14,0	15720	0 minutos
0,50	0,74	2,15	7012	3506	7,33	37,0	257	10,7	4525	60 minutos
1,49	1,53	1,87	5110	2555	4,89	19,0	163	5,8	1296	
2,05	2,91	2,16	4267	2134	1,22	8,2	82	3,7	732	
2,33	3,69	6,73	2833	1417	0,096	2,4	10,0	1,2	188	
4,18	4,63	9,51	1412	706	0,035	2,0	3,0	0,3	15,0	
4,98	6,51	11,11	920	460	0,016	1,1	1,0	0,1	1,0	
9,35	7,54	11,26	902	451	0,007	0,5	1,0	0,1	1,0	

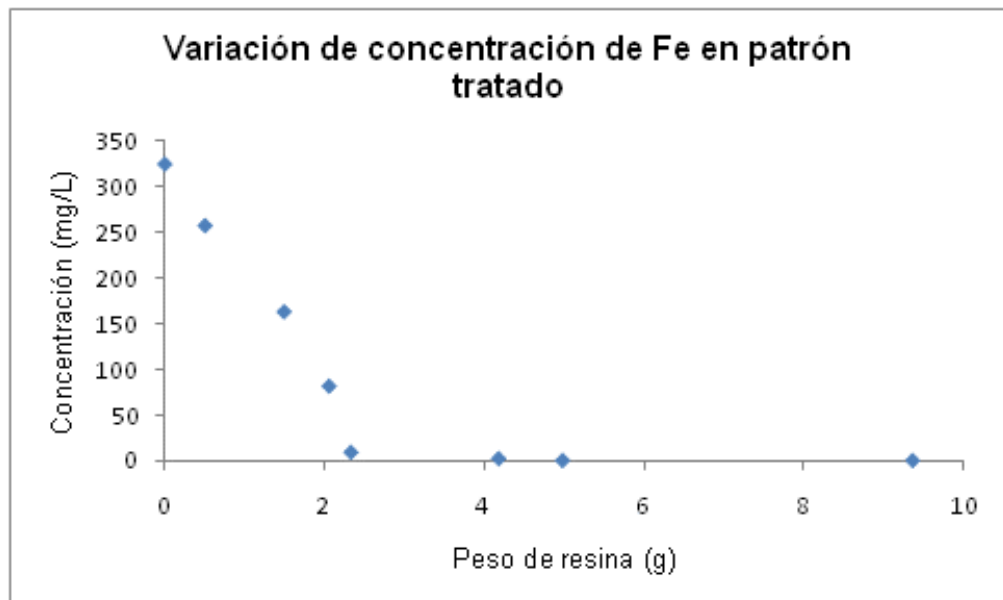
Fuente: El autor, 2013.

Figura 15. Variación de concentración de sólidos totales presentes en el patrón tratado



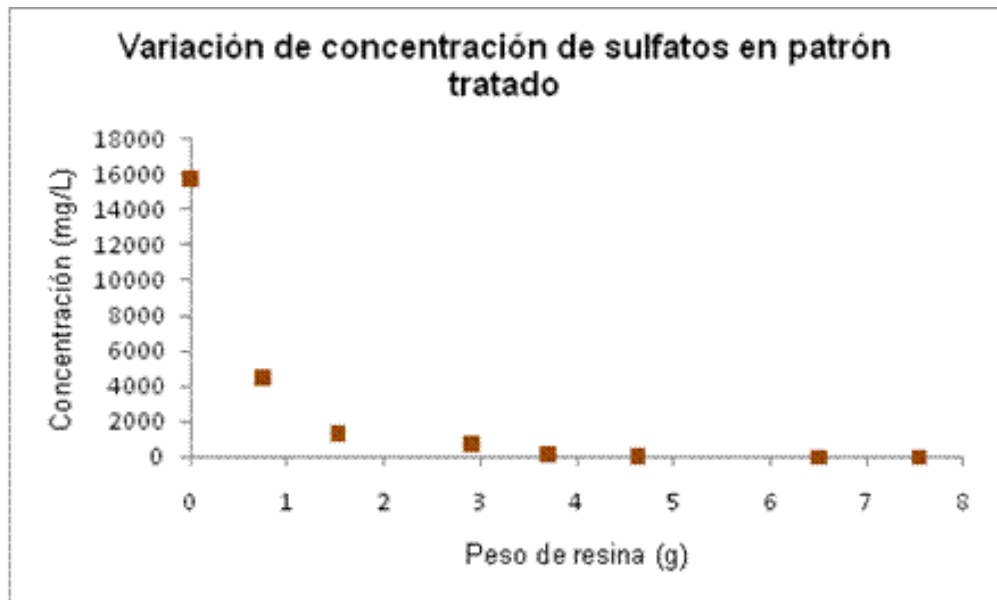
Fuente: El autor, 2013.

Figura 16. Variación de concentración de iones Fe presentes en el patrón tratado



Fuente: El autor, 2013.

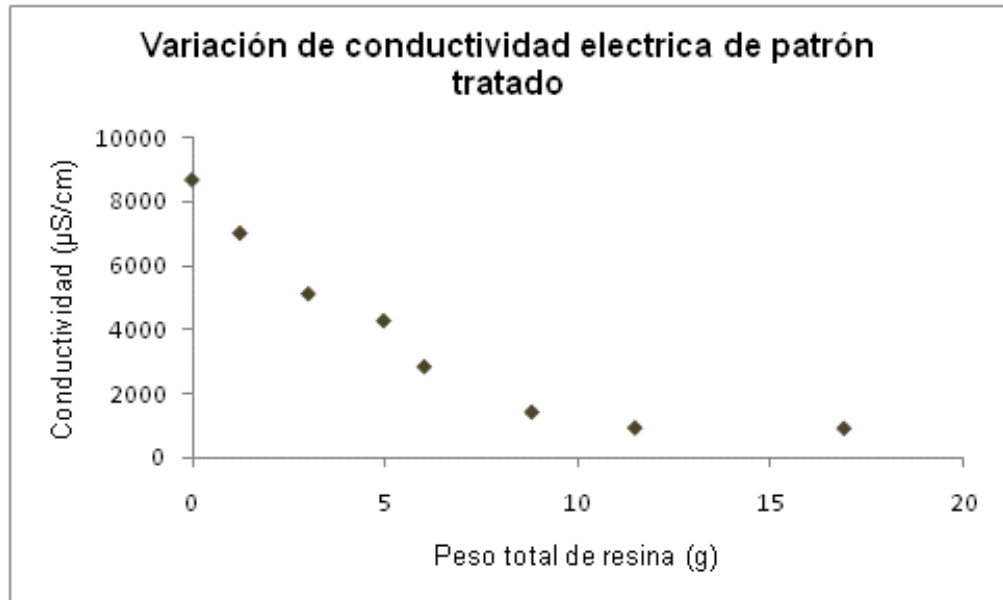
Figura 17. Variación de concentración de iones sulfato presentes en el patrón tratado



Fuente: El autor, 2013.

Como se puede observar en las figuras 15 a 17, el tratamiento a condiciones controladas presentó un comportamiento similar al registrado en las pruebas a condiciones ambientales, pues, para este caso, también se evidenció la disminución en la concentración de sólidos totales, hierro y sulfatos en la muestra post-tratamiento, lo cual permitió confirmar que el comportamiento de la resina se mantiene en cuanto al intercambio iónico se refiere, corroborando que el mismo depende de la cantidad de resina empleada, pues a mayor cantidad de resina, mayor cantidad de sitios activos disponibles en la misma.

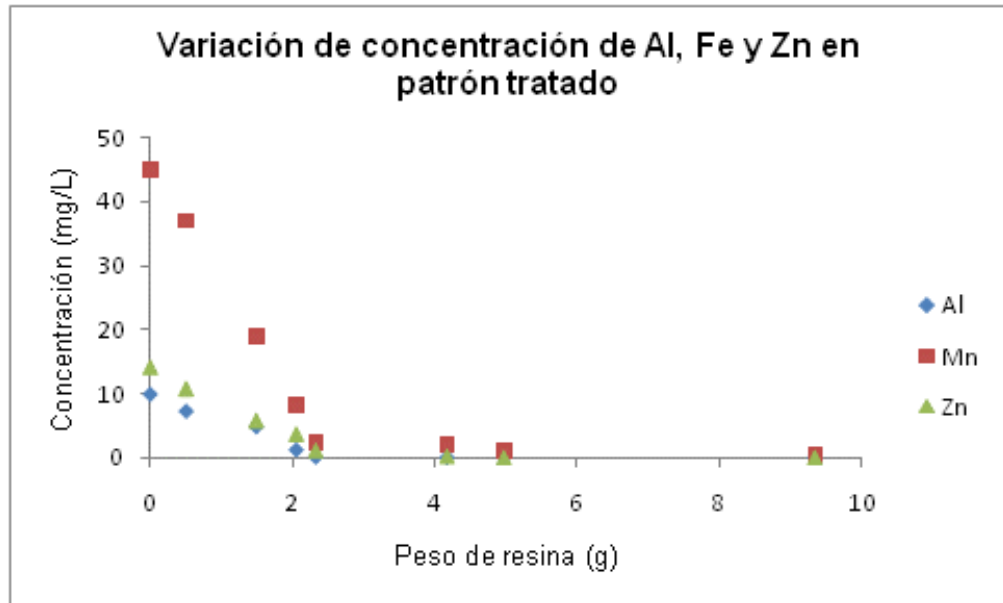
Figura 18. Variación de conductividad eléctrica en el patrón tratado



Fuente: El autor, 2013.

Según lo señala la figura 18, se observó una disminución en la conductividad eléctrica del patrón tratado, la cual se encuentra directamente relacionada con la concentración de sólidos totales y la concentración de los analitos presentes en la muestra tratada, por ende, una disminución en estos parámetros se verá reflejada en una disminución de la conductividad eléctrica.

Figura 19. Variación de concentración de cationes presentes en el patrón tratado

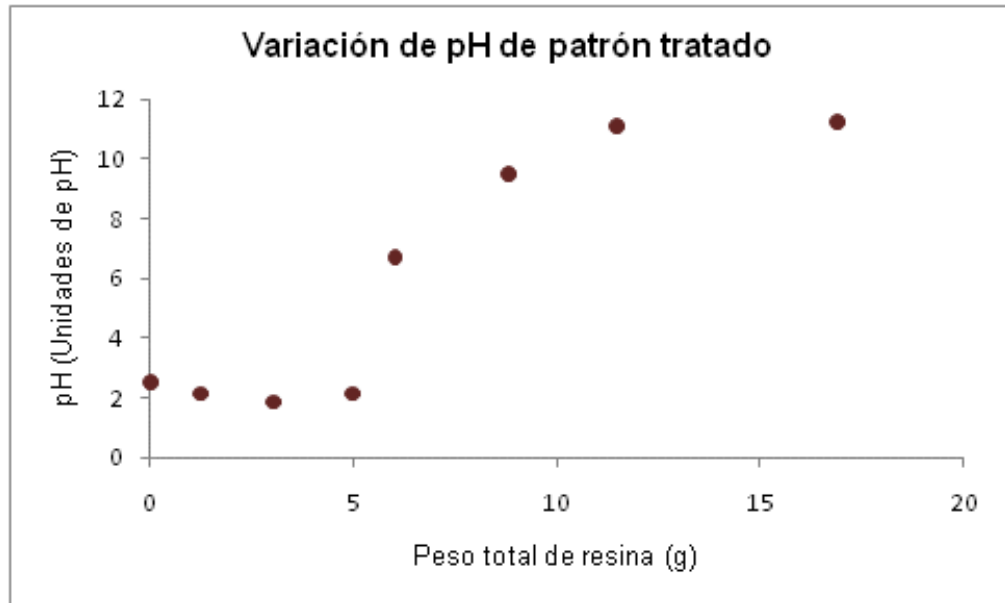


Fuente: El autor, 2013.

Como se puede observar en la figura 19, el tratamiento de la solución patrón presentó un comportamiento similar al registrado en las pruebas anteriores, el cual se vio reflejado en el descenso progresivo en las concentraciones de aluminio, hierro y zinc, el cual se encuentra directamente relacionado con la cantidad de resina empleada, pues al aumentar la cantidad de esta última, aumenta la cantidad de sitios disponibles para realizar el intercambio y por ende aumenta la cantidad de iones capturados durante el tratamiento.

Cabe señalar, que contrario a lo sucedido en las pruebas de tratamiento a condiciones ambientales, en el tratamiento de la solución patrón no se observaron concentraciones finales de los analitos superiores a las iniciales.

Figura 20. Variación de pH en el patrón tratado



Fuente: El autor, 2013.

De acuerdo con registrado en la figura 20, se pudo observar que la variación del pH durante el tratamiento del patrón, presentó un comportamiento semejante al que exhiben las volumetrías de neutralización de ácidos monopróticos. Este comportamiento se debe a la proporción de resinas empleadas y principalmente a la acción de la resina Lewatit Monoplus M500, ya que ésta requiere la liberación de dos iones  $\text{OH}^-$  por cada ión  $\text{SO}_4^{2-}$  intercambiado, produciendo un aumento progresivo en el pH final del patrón tratado.

Es necesario resaltar que para todas las pruebas que se realizaron tanto a condiciones ambientales como a condiciones controladas, el tiempo total de tratamiento fue de 60 minutos, los cuales se distribuyeron así: 30 minutos para tratamiento con resina Lewatit S100 y 30 minutos para tratamiento con resina Lewatit Monoplus M500.

### 3.3. PRUEBAS PRELIMINARES EN COLUMNA PARA RESINA CATIONICA

Con el propósito de conocer el comportamiento de la resina de intercambio catiónico en sistemas de tipo continuo, se realizó una prueba preliminar en columna, la cual se construyó de acuerdo con las especificaciones establecidas.

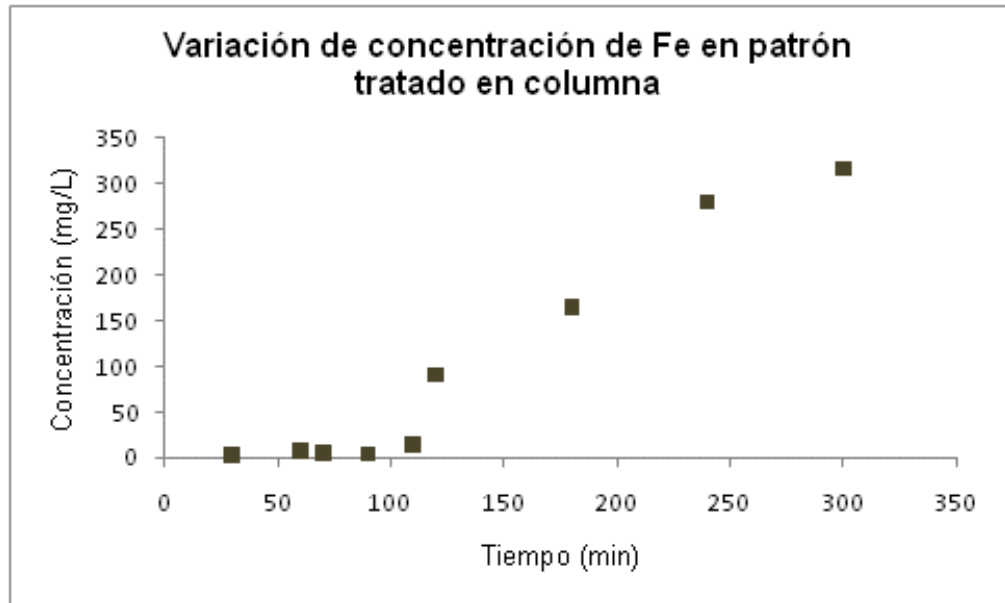
Para la construcción de la columna se empleó tubería de PVC cuyo diámetro interno fue de 1 pulgada y una altura de lecho de 80 cm. Se emplearon aproximadamente 448 gramos de resina Lewatit S100, 30 litros de solución patrón y el flujo de entrada en la cabeza de la columna fue de 100mL/min, obteniendo los resultados presentados en la tabla 20.

Tabla 20. Variación de la concentración de iones metálicos. Tratamiento de patrón en columna.

Tiempo (min)	CONCENTRACION (mg/L)			
	Al	Mn	Fe	Zn
30	0,1	0	3	2
60	0	0	7	3
70	0	0	6	2
90	0	10	4	4
110	0	10	14	3
120	0,6	10	91	7
180	1,4	28	165	11
240	7,2	37	280	14
300	9,7	44	316	14

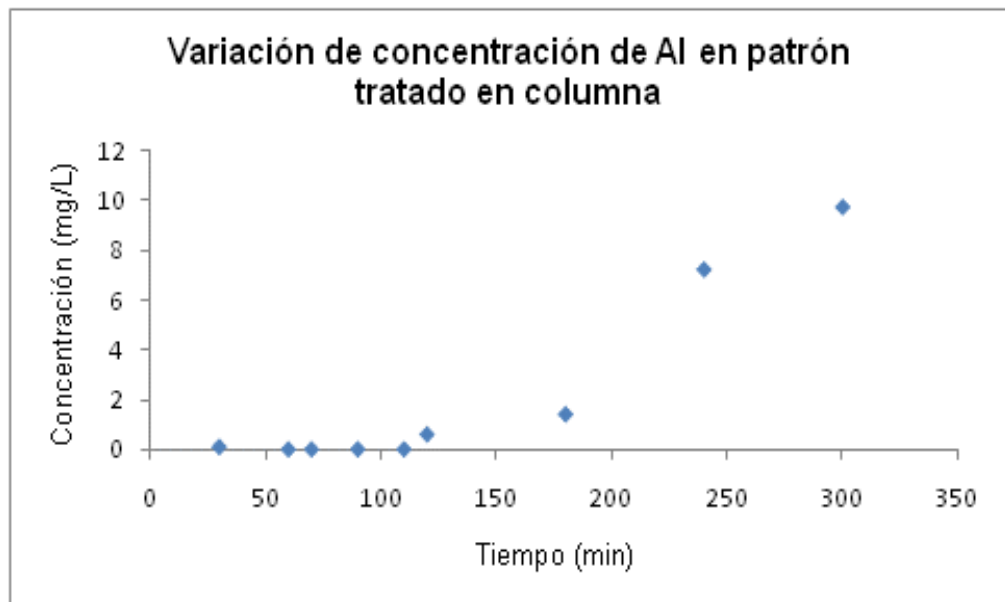
Fuente: El autor, 2013.

Figura 21. Variación de concentración de hierro en patrón tratado en columna



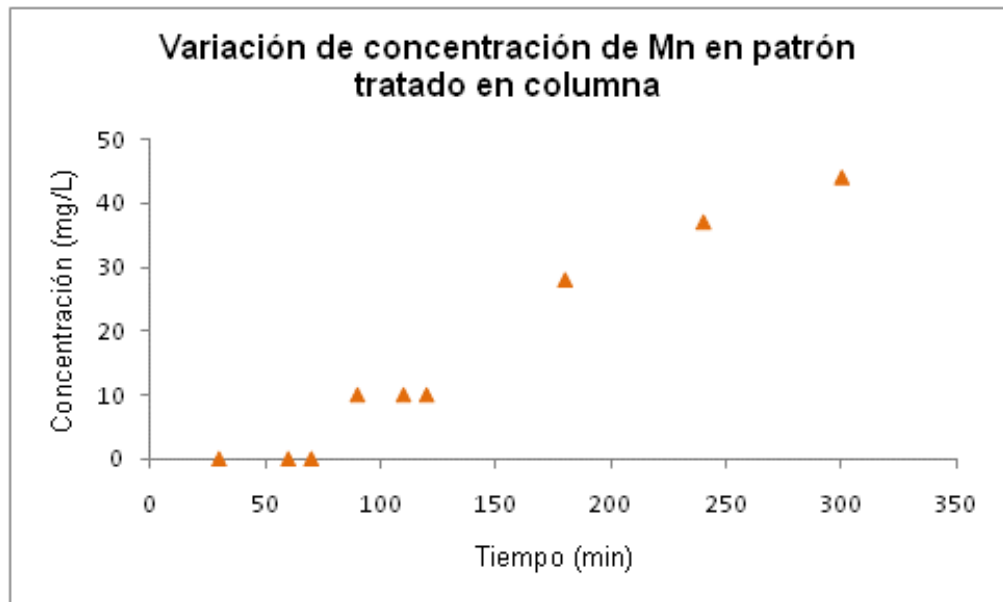
Fuente: El autor, 2013.

Figura 22. Variación de concentración de aluminio en patrón tratado en columna



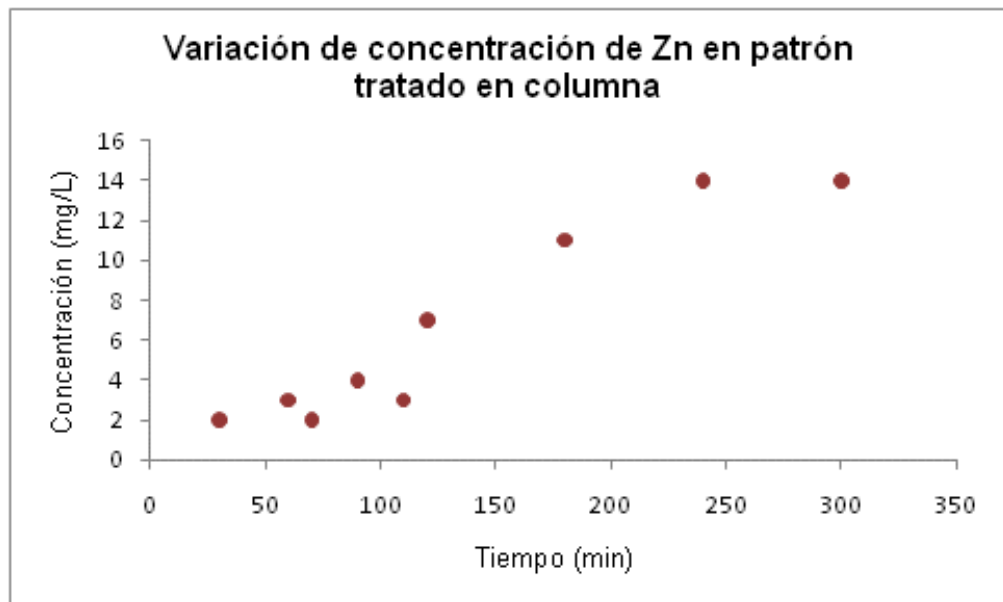
Fuente: El autor, 2013.

Figura 23. Variación de concentración de manganeso en patrón tratado en columna



Fuente: El autor, 2013.

Figura 24. Variación de concentración de zinc en patrón tratado en columna



Fuente: El autor, 2013.

De acuerdo con los resultados mostrados en las figuras 21 a 24, se pudo observar que el tratamiento de la solución patrón, en una columna empacada, produjo un marcado descenso en la concentración final de los analitos de interés, comparado con la concentración inicial del patrón, toda vez que transcurridos 70 minutos de tratamiento, el porcentaje de remoción de iones de aluminio, hierro y manganeso se encontraron entre el 95% y el 100%; para el caso de los iones de zinc, en el mismo lapso de tiempo, el porcentaje de remoción se ubicó en un rango entre el 78% y el 85%.

De igual manera, cuando el proceso se encontraba en el rango de tiempo comprendido entre los 90 y 110 minutos de tratamiento, se pudo determinar que la remoción de iones hierro y aluminio se conservó entre el 95% y el 100%. Así mismo, el porcentaje de remoción de iones de zinc se ubicó entre el 71% y el 79%. Para el caso de los iones de manganeso se pudo observar un descenso en el porcentaje de remoción, siendo del 77.78% para este lapso de tiempo.

Transcurridos 120 minutos de tratamiento se pudo establecer que el porcentaje de remoción de algunos iones comenzó a disminuir, mostrándose para el aluminio un porcentaje de remoción del 94%, para el hierro un porcentaje de 71.9% y para el zinc se redujo a 50%. El único porcentaje de remoción que se mantuvo en el lapso comprendido entre los 110 y 120 minutos de tratamiento fue el de iones manganeso, el cual se conservó en 77.78%

Cuando el proceso de tratamiento alcanzó los 180 minutos, se pudo determinar que el porcentaje de remoción para los iones aluminio, hierro, manganeso y zinc continuó descendiendo, mostrando valores de 86%, 49.07%, 37,78% y 21.43% respectivamente.

Finalmente, en el lapso comprendido entre los 240 y 300 minutos de tratamiento se estableció que el porcentaje de remoción de iones aluminio se encontró entre el 28% y el 3%; para el caso de iones hierro, el porcentaje de remoción se ubicó en un rango entre el 13.58% y el 2.47%; el porcentaje de remoción de iones manganeso se estableció entre el 17.78% y el 2.22%. Finalmente, el porcentaje de remoción de iones zinc se redujo a 0% en este lapso de tiempo.

El descenso en el porcentaje de remoción de iones a lo largo del proceso, se explica dada la creciente saturación de la resina durante el mismo, toda vez que con el paso del tiempo y dado el flujo constante de solución patrón a través de la columna, se presentó un proceso de intercambio iónico constante, el cual produjo una disminución creciente de los sitios activos de la resina y una vez ésta alcanzó su grado de saturación máximo perdió su actividad, razón por la cual, las concentraciones de los analitos de interés, una vez transcurrida la totalidad del tiempo establecido para el tratamiento, alcanzaron valores iguales o semejantes a los reportados en la solución patrón antes del tratamiento.

Dados los resultados obtenidos durante el proceso de tratamiento, se pudo establecer que la resina presenta un comportamiento óptimo hasta los 90 minutos de tratamiento pues en este lapso de tiempo el porcentaje de remoción de iones se mantuvo en un rango entre el 78% y el 100% de remoción.

### 3.4. CINÉTICA DEL PROCESO

Una vez concluidas todas las pruebas de tratamiento, así como la prueba preliminar en columna, se procedió a determinar la cinética del proceso de

tratamiento, para lo cual inicialmente, se emplearon los resultados promedio obtenidos en las pruebas a condiciones controladas y se calculó la concentración de los analitos de interés en meq-g/L, obteniendo los resultados registrados en la tabla 21.

Tabla 21. Valores de C y Co-C calculados.

Peso de Resina (g)	CONCENTRACIÓN (mg/L)				C (meq-g/L)	Co-C (meq-g/L)
	Al	Mn	Zn	Fe		
0	10	45	14	324	14,226	0
0,503	7,33	37	10,7	257	11,2859	2,9401
1,49	4,89	19	5,8	163	9,5213	4,7047
2,054	1,22	8,2	3,7	82	3,4162	10,8098
2,327	0,096	2,4	1,2	10	0,4875	13,7385
4,176	0,035	2	0,3	3	0,1914	14,0346
4,975	0,016	1,1	0,3	1	0,08592	14,14008
9,353	0,007	0,5	0,1	1	0,05747	14,16853

Fuente: El autor, 2013.

Como se puede observar, al igual que la concentración en mg/L, la concentración calculada en meq-g/L de los analitos de interés también presentó un descenso a medida que se aumenta la cantidad de resina empleada en el tratamiento, lo cual es congruente debido a la relación existente entre tales unidades de concentración.

Una vez calculada la concentración de los analitos en meq-g/L, se procedió a calcular el valor de la concentración de soluto en el sólido (q), para lo cual se emplearon los diferentes valores calculados de Co-C y cada uno fue dividido por su respectivo peso de resina. Finalmente se determinaron los valores requeridos

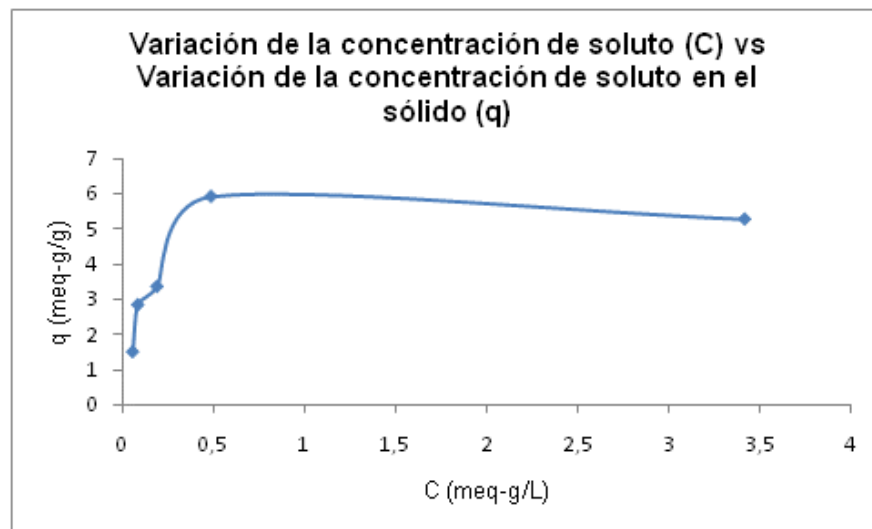
para la linealización y determinación de las isothermas de Freundlich y Langmuir, reportados en la tabla 22.

Tabla 22. Datos iniciales calculados para la determinación de las isothermas de Freundlich y Langmuir.

DATOS INICIALES		ISOTERMA FREUNDLICH		ISOTERMA DE LANGMUIR	
C	q	Ln C	Ln q	1/C	1/q
11,2859	5,84512922	2,42355416	1,7656087	0,08860614	0,17108262
9,5213	3,15751678	2,25353139	1,14978589	0,10502767	0,31670457
3,4162	5,26280428	1,22852882	1,66066402	0,29272291	0,19001277
0,4875	5,90395359	-0,71846499	1,77562223	2,05128205	0,16937803
0,1914	3,36077586	-1,6533898	1,21217186	5,2246604	0,29755034
0,08592	2,84222714	-2,45433865	1,04458795	11,6387337	0,35183676
0,05747	1,51486475	-2,85649221	0,41532616	17,4003828	0,66012494

Fuente: El autor, 2013.

Figura 25. Variación de concentración de soluto vs variación de concentración de soluto en el sólido

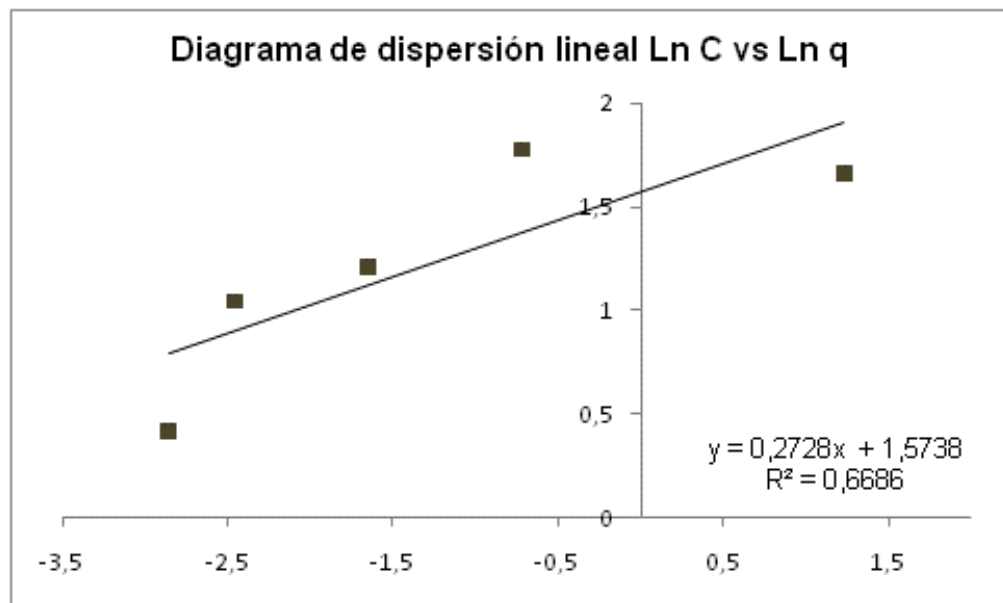


Fuente: El autor, 2013.

Como se puede observar en la figura 25, los resultados de C y q describen un comportamiento propio de las isothermas de adsorción, no obstante esta gráfica no permite determinar el tipo de isoterma de adsorción que describe de manera adecuada la cinética del proceso.

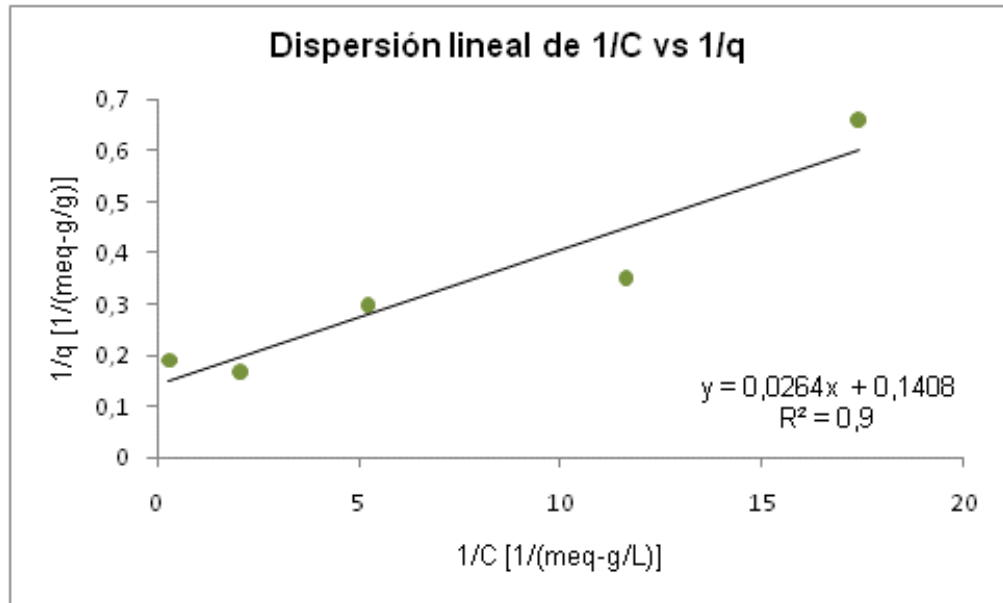
Teniendo en cuenta lo anterior y a partir de los datos calculados para la determinación de las isothermas de Freundlich y Langmuir, se obtuvieron las gráficas de dispersión lineal mostradas en las figuras 26 y 27.

Figura 26. Isoterma de adsorción de Freundlich linealizada



Fuente: El autor, 2013.

Figura 27. Isotherma de adsorción de Langmuir linealizada



Fuente: El autor, 2013.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la selección de la isoterma de adsorción más adecuada para el proceso, depende principalmente del coeficiente de correlación de los datos empleados para la construcción de las mismas, razón por la cual se estableció que el proceso de tratamiento presenta una cinética propia de las isotermas de Langmuir, pues el coeficiente de correlación de los datos es de 0,9, lo cual permitió establecer que el tratamiento de DAM mediante resinas de intercambio iónico se trata de un proceso mono capa y de adsorción reversible, lo cual se ve reflejado en los resultados obtenidos en la prueba preliminar realizada en columna empleando resina Lewatit S100.

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente obtenidos para los analitos estudiados, se determinó que para el proceso de tratamiento realizado a condiciones controladas, la cantidad máxima de soluto que puede adsorberse por

gramo de adsorbente ( $q_s$ ) es de 7,1023 meq-g/g, mientras que la constante de equilibrio de adsorción (constante de Langmuir) es 5.333 meq-g.

#### 4. CONCLUSIONES

- La cantidad de iones removidos en el tratamiento a condiciones ambientales y controladas es proporcional a la cantidad de resina empleada.
- La remoción de metales depende de la afinidad que la resina muestra frente a los diferentes iones metálicos existentes en el fluido a tratar.
- La remoción de iones en las muestras tratadas, se ve reflejada en la disminución de la conductividad eléctrica y la disminución en la concentración de sólidos totales.
- La resina de intercambio iónico Lewatit S100, puede realizar tratamiento de aguas con concentraciones 10 veces superiores a la concentración inicial de los DAM estudiados, sin perder su efectividad.
- El tratamiento a condiciones controladas de soluciones patrón con elevadas concentraciones de sulfatos, es posible mediante resinas de intercambio Lewatit Monoplus M500, y se pueden obtener concentraciones cercanas a cero.

- El tratamiento en columna empleando resina Lewatit S100 presenta un comportamiento similar al registrado en las pruebas a condiciones ambientales y controladas, razón por la cual podría emplearse como sistema de tratamiento a condiciones reales.
  
- Los resultados obtenidos en las pruebas en columna muestran una remoción de iones superior al 90%, razón por la cual se presentan las resinas de intercambio iónico como un método complementario y alternativo en el tratamiento de DAM, toda vez que la normatividad ambiental vigente exige una reducción de las cargas contaminantes de los vertimientos en índices superiores al 80%.
  
- El tratamiento en columna con resina Lewatit S100 permite obtener concentraciones de iones metálicos cercanas a cero durante los primeros 90 minutos de tratamiento.
  
- El tratamiento en columna, a tiempos superiores a 90 minutos producen desgaste de la resina, saturación de la misma y por ende una disminución de la efectividad en la remoción de iones metálicos.
  
- La cinética del proceso de tratamiento a condiciones controladas corresponde a una isoterma de adsorción de Langmuir, la cual es de tipo mono capa y de carácter reversible.

## 5. RECOMENDACIONES

- Profundizar en la caracterización fisicoquímica del mineral de carbón existente en las minas de Boyacá y Santander con el propósito de determinar de manera concreta la concentración de azufre en el mismo.
- Emplear otras resinas de intercambio iónico, con el propósito de determinar si el comportamiento identificado en este estudio se conserva, o si existen diferencias frente al uso de otras resinas de intercambio.
- Realizar tratamiento en columna con resina Lewatit Monoplus M500, a fin de establecer el comportamiento de la misma y el tiempo máximo en el cual la resina es efectiva sin presentar fenómenos de saturación.
- Realizar pruebas a condiciones ambientales, controladas y en columna, empleando resinas de intercambio regeneradas, a fin de determinar si estas conservan su actividad o si la misma disminuye después de la regeneración y determinar cuántas regeneraciones son posibles antes de desechar finalmente las resinas de intercambio empleadas.

## BIBLIOGRAFÍA

AGOUBORDE MANOSALVA L. Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales. Memoria presentada para optar al título de Magíster en Ciencias de Recursos Naturales. Universidad de La Frontera. Chile. 2008. Pág. 17-96.

CADORIN L., CARISSIMI E., RUBIO J. Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. Scientia et Technica. Año XIII, No. 36, Septiembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

CARPIO E.D., ANGULO L.C., ROSADO L.J. Diseño de un sistema de indicadores ambientales para minería de carbón en Colombia. Caso minas del departamento del Cesar, Colombia. Vol. 6, No. 1. Enero-Julio de 2008.

Comisión Europea, Dirección General CCI. Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos. Prevención y control integrados de la contaminación. Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para el sector de tratamiento de residuos. España. 2006.

Comisión Nacional de Agua. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada. México. 2007.

ELIAS XAVIER. Reciclaje de Residuos Industriales. Segunda Edición. Editorial Díaz de Santos.

FERNANDEZ-ALBA A., LETÓN GARCÍA P., ROSAL GARCÍA R., DORADO VALIÑO M., VILLAR FERNÁNDEZ S., SANZ GARCÍA M. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. España.

FLORES ESPINOSA R., ORTIZ OLIVEROS H., BONIFACIO MARTINEZ J., RIVERO ESPEJEL I. Termodegradación de resinas agotadas de intercambio iónico de lecho mixto. Rev. Int. Contam. Ambie. 27(3) 223-230, 2011.

GRÁGEDA ZEGARRA Mirko, GRÁGEDA ZEGARRA Mario. Desarrollos actuales en tratamientos de riles por métodos electroquímicos. Ciencia abierta 29(Mayo 2006): 12-20.

HUERGA PÉREZ E. Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes. Memoria para optar al título de Doctor. Universidad de Valencia. España. 2005. Pág. 3-344.

NOGUEROL ARIAS J. Tecnologías limpias para la reducción de contaminantes y la recuperación de solutos de fuentes hidrominerales mediante resinas de intercambio iónico. Memoria presentada para optar al título de Doctor en Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Barcelona. España. 1996. Pág. 13-110.

ORTEGA K.Y. Recuperación de oro desde soluciones cianuradas por intercambio iónico en la Compañía Minera Aurífera Santa Rosa S.A. Memoria presentada para optar al título de Ingeniero Metalurgista. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú. 2009.

Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero. Lima. 2005. Pág. 26-27.

PACHECO L.A., DURAN DOMÍNGUEZ de-BAZÚA M. Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso. Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ) 22(1): 15-29, 2007.

RAIMOND B. SEYMUR. Introducción a la Química de los Polímeros. Segunda Edición. Editorial Reverté.

Rao, S.R., Finch, J.A. 1988. A review of water re-use in flotation. Minerals Engineering. 2(1):65-85.

RINCÓN J.M., El carbón y su problemática. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 26(99) 271-278. ISSN 0370-3908.

SANTANDER M., PAIVA M., SILVA R., RUBIO J. Tratamiento de riles del sector minero-metalúrgico y reutilización de las aguas. Universidad de Atacama. Revista de la Facultad de Ingeniería. 25(2011): 10-26.

YAGNENTKOVSKY N. Aplicación de técnicas de biorremediación para el tratamiento de residuos industriales con alto contenido de metales pesados. Memoria para optar al título de Doctor en Química. Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 2011. Pág. 2-6.

Recursos electrónicos:

Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Fecha de acceso: Enero 16 de 2013. Disponible en <http://www.madridmads.org>.

<http://www.carbunion.com>. Fecha de acceso: Abril 18 de 2012.

<http://recursosmineralesdecolombia.weebly.com>. Fecha de acceso: Abril 19 de 2012.

<http://www.proexport.gov.co>. Fecha de acceso: Abril 19 de 2012.

<http://www.renovablesverdes.com>. Fecha de acceso: Mayo 2 de 2012.

<http://www.filtrantes.com.mx>. Fecha de acceso: Mayo 3 de 2012.

<http://www.cnea.gov.ar>. Fecha de acceso: Mayo 15 de 2012.

<http://www.hach-latinoamerica.com>. Fecha de acceso: Julio 18 de 2012.

<http://www.hannacolombia.com>. Fecha de acceso: Julio 18 de 2012.

## ANEXOS

### ANEXO A. FICHA TECNICA RESINA LEWATIT S100

# FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

LEWATIT MonoPlus S100

**LANXESS**  
Energizing Chemistry

05274877

## 1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O EL PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA

### Identificación de la sustancia o el preparado

**Nombre del producto** : LEWATIT MonoPlus S100  
**Uso de la sustancia o del preparado** : Intercambiadores de iones, resinas y catalizadores  
**Proveedor/Fabricante** : LANXESS Deutschland GmbH, Industrial & Environmental Affairs  
51369 Leverkusen, Alemania,  
Núm. de Teléfono: +49 214 30 65109  
E-mail: infosds@lanxess.com  
**Teléfono de emergencia** : 704.10.00.87 (Spain)

## 2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Este producto no está clasificado como peligroso de acuerdo con la Directiva 1999/45/CEE y sus enmiendas.

Consulte la sección 11 para obtener una información más detallada acerca de los efectos sobre la salud y síntomas.

## 3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

**Definición del producto (REACH)** : Preparado

Estireno-divinilbenceno-acrilonitrilo-copolímero con grupos sulfoácidos en forma de sodio

Según los conocimientos actuales del suministrador, este producto no contiene ningún ingrediente peligroso en cantidades que deban ser mencionadas en esta sección, de acuerdo con las reglamentaciones de la UE o las reglamentaciones nacionales.

## 4. PRIMEROS AUXILIOS

### Primeros auxilios

**Inhalación** : Trasladar a la persona afectada al aire libre. Mantenga a la persona caliente y en reposo. Si no hay respiración, ésta es irregular u ocurre un paro respiratorio, el personal capacitado debe proporcionar respiración artificial u oxígeno. Obtenga atención médica si se presentan síntomas. Si está inconsciente, coloque en posición de recuperación y consiga atención médica inmediatamente. Asegure una buena circulación de aire. Aflojar todo lo que pudiera estar apretado, como el cuello de una camisa,

**Fecha de emisión** : 2009-06-09

**Página:** 1/7

	una corbata, un cinturón.
<b>Ingestión</b>	: Lave la boca con agua. Transladar a la persona afectada al aire libre. Mantenga a la persona caliente y en reposo. Si se ha ingerido material y la persona expuesta está consciente, suminístrele pequeñas cantidades de agua para beber. Deje de proporcionarle agua si la persona expuesta se encuentra mal ya que los vómitos pueden ser peligrosos. No inducir al vómito a menos que lo indique expresamente el personal médico. Si vomita, mantener la cabeza baja de manera que el vómito no entre en los pulmones. Obtenga atención médica si se presentan síntomas. No suministrar nada por vía oral a una persona inconsciente. Si está inconsciente, coloque en posición de recuperación y consiga atención médica inmediatamente. Asegure una buena circulación de aire. Aflojar todo lo que pudiera estar apretado, como el cuello de una camisa, una corbata, un cinturón.
<b>Contacto con la piel</b>	: Lave con agua abundante la piel contaminada. Qúitese la ropa y calzado contaminados. Obtenga atención médica si se presentan síntomas. Lavar la ropa antes de volver a usarla. Limpiar completamente el calzado antes de volver a usarlo.
<b>Contacto con los ojos</b>	: Enjuagar los ojos inmediatamente con mucha agua, levantando ocasionalmente los párpados superior e inferior. Verificar si la víctima lleva lentes de contacto y en este caso, retirárselas. Continúe enjuagando por lo menos durante 10 minutos. Obtenga atención médica si se produce irritación.

Consulte la sección 11 para obtener una información más detallada acerca de los efectos sobre la salud y síntomas.

## 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

### Medios de extinción

<b>Apropiado(s)</b>	: En caso de incendio, use agua pulverizada (neblina), espuma, productos químicos secos o CO <sub>2</sub> .
<b>No apropiado(s)</b>	: No se conoce ninguno.
<b>Peligros de exposición especiales</b>	: No existe un peligro específico de incendio o explosión.  En caso de incendio, aisle rápidamente la zona evacuando a todas las personas de las proximidades del lugar del incidente. No debe realizarse acción alguna que suponga un riesgo personal o sin una formación adecuada.
<b>Productos peligrosos de la combustión</b>	: Los productos de descomposición pueden incluir los siguientes materiales: óxidos de carbono óxidos de azufre óxido/óxidos metálico/metálicos
<b>Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios</b>	: Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

## 6. MEDIDAS EN CASO DE LIBERACIÓN ACCIDENTAL

- Precauciones personales** : No debe realizarse acción alguna que suponga un riesgo personal o sin una formación adecuada. No deje que entre el personal innecesario y sin protección. Proporcione ventilación adecuada. Use equipo protector personal adecuado (vea sección 8). Riesgo de resbalarse en producto derramado.
- Precauciones ambientales** : Evite la dispersión del material derramado, su contacto con el suelo, el medio acuático, los desagües y las alcantarillas. Informe a las autoridades pertinentes si el producto ha causado contaminación medioambiental (alcantarillas, canales, tierra o aire).
- Gran derrame** : Retire los envases del área del derrame. Evite que se introduzca en alcantarillas, canales de agua, sótanos o áreas reducidas. Vacíe o barra el material y colóquelo en un envase de desperdicio etiquetado. Elimine por medio de un contratista autorizado para la eliminación. Nota: Véase la sección 1 para información de contacto de emergencia y la sección 13 para eliminación de desechos.
- Derrame pequeño** : Retire los envases del área del derrame. Vacíe o barra el material y colóquelo en un envase de desperdicio etiquetado. Elimine por medio de un contratista autorizado para la eliminación.

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

- Manipulación** : Use equipo protector personal adecuado (vea sección 8). Deberá prohibirse comer, beber o fumar en los lugares donde se manipula, almacena o trata este producto. Las personas que trabajan con este producto deberán lavarse las manos y la cara antes comer, beber o fumar. No ingerir. Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Consérvese en su envase original o en uno alternativo aprobado fabricado en un material compatible, manteniéndose bien cerrado cuando no esté en uso. Los envases vacíos retienen residuos del producto y pueden ser peligrosos.
- Almacenamiento** : Consérvese entre las siguientes temperaturas: -20 a 40°C (-4 a 104°F). Conservar de acuerdo con las normativas locales. Almacenar en el contenedor original protegido de la luz directa del sol en un área seca, fresca y bien ventilada, separado de materiales incompatibles (ver sección 10) y comida y bebida. Mantener el contenedor bien cerrado y sellado hasta el momento de usarlo. Los envases abiertos deben cerrarse perfectamente con cuidado y mantenerse en posición vertical para evitar derrames. No almacenar en contenedores sin etiquetar. Utilícese un envase de seguridad adecuado para evitar la contaminación del medio ambiente.
- Materiales de embalaje**
- Recomendado** : Utilizar el contenedor original.
- Observaciones** : No permita que se seque. Tomar medidas de precaución contra la acumulación de cargas electrostáticas.

## 8. CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

**Valores límite de la exposición** : No disponible.

**Procedimientos recomendados de control** : Si este producto contiene ingredientes con límites de exposición, puede ser necesaria la supervisión personal, del ambiente de trabajo o biológica para determinar la efectividad de la ventilación o de otras medidas de control y/o la necesidad de usar equipo respiratorio protector. Se debe hacer referencia al Estándar europeo EN 689 por métodos para evaluar la exposición por inhalación a agentes químicos y la guía nacional de documentos por métodos para la determinación de sustancias peligrosas.

### Medidas de gestión de riesgos:

#### Controles de la exposición profesional

**medidas técnicas** : Si este producto contiene ingredientes de exposición limitada, use cercamientos del proceso, ventilación local, u otros controles de ingeniería para mantener la exposición del obrero por debajo de todos los límites recomendados o estatutarios.

#### equipo de protección personal

- Protección respiratoria** : Use un respirador purificador de aire o con suministro de aire, que esté ajustado apropiadamente y que cumpla con las normas aprobadas si una evaluación del riesgo indica es necesario. La selección del respirador se debe basar en el conocimiento previo de los niveles, los riesgos de producto y los límites de trabajo de seguridad del respirador seleccionado.
- Protección de las manos** : Guantes químico-resistentes e impenetrables que cumplen con las normas aprobadas deben ser usados siempre que se manejen productos químicos si una evaluación del riesgo indica que es necesario. Tras producirse contaminación con el producto, cambiar inmediatamente el guante y eliminarlo conforme a las normas. <1 horas (tiempo de detección): PVC , caucho nitrílico , polidioropreno - CR
- Protección de los ojos** : Equipo protector ocular que cumpla con las normas aprobadas debe ser usado cuando una evaluación del riesgo indique que es necesario para evitar toda exposición a salpicaduras del líquido, lloviznas, gases o polvos.  
Recomendado: gafas de seguridad con protección lateral
- Protección cutánea** : Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista.
- Medidas higiénicas** : Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del período de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para remover ropa contaminada. Lavar las ropas contaminadas antes de volver a usarlas. Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

#### Controles de la exposición del medio ambiente

**medidas técnicas** : Emisiones de los equipos de ventilación o de procesos de trabajo deben ser evaluados para verificar que cumplen con los requisitos de la legislación de protección del medio ambiente. En algunos casos será necesario el uso de eliminadores de humo, filtros o modificaciones del diseño del equipo del proceso para reducir las emisiones a un nivel aceptable.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

### Información general

#### Apariencia

**Estado físico** : Sólido. [perlas]  
**Color** : Marrón claro.  
**Olor** : Inodoro.

### Información importante en relación con la salud, la seguridad y el medio ambiente

**Densidad** : 1.28 kg/L (20 °C)  
**Densidad aparente** : 800 a 900 kg/m<sup>3</sup>  
**Temperatura de ignición:** : >250°C

## 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

**Estabilidad** : El producto es estable.  
**Posibilidad de reacciones peligrosas** : En condiciones normales de almacenamiento y uso, no se producen reacciones peligrosas.  
**Condiciones que deben evitarse** : Con oxidantes fuertes, riesgo de reacciones peligrosas. Ninguna reacción peligrosa, si se utiliza adecuadamente.  
**Materias que deben evitarse** : Ningún dato específico.  
**Productos de descomposición peligrosos** : En condiciones normales de almacenamiento y uso, no se deberían formar productos de descomposición peligrosos.

## 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

### Toxicidad aguda

Nombre del producto o Ingrediente	Resultado	Especies	Dosis	Exposición	Prueba
LEWATIT MonoPlus S100	DL50 Oral	- Rata	>5000 mg/kg	-	-

### Irritación/Corrosión

**Piel** : No irritante  
**Ojos** : No irritante

## 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

- AOX** : El producto no contiene halógenos ligados a productos orgánicos que pudieran incrementar el valor de AOX (halógenos orgánicos absorbibles) de las aguas residuales.
- Observaciones** : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.

## 13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

- Métodos de eliminación** : Comprobar la reutilizabilidad. Los residuos de productos y los envases vacíos que contengan residuos se embalarán o cerrarán respectivamente, marcándose y disponiéndolos para su evacuación adecuada o su reutilización observando las normas locales vigentes. Tratándose de grandes cantidades, hablar con el proveedor. Al traspasar los envases vacíos sin limpiar, debe avisarse al usuario de los posibles peligros debido a restos del producto. Para su eliminación dentro de la CE, se debe utilizar el código apropiado según la Lista de Residuos Europeos (EWL). Es responsabilidad del generador asignar el residuo a los códigos residuales específicos para los sectores y procesos industriales, según la Lista Europea de Residuos (EWL).
- Residuos Peligrosos** : El proveedor no considera este producto como un residuo peligroso, en virtud de la Directiva de la UE 91/689/CE.

## 14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Regulación	Número ONU	Nombre y descripción	Clase	PG	Etiqueta	Información adicional
ADR/RID	-	-	-	-	-	No regulado.
GGVSE	-	-	-	-	-	No regulado.
ADNR	-	-	-	-	-	No regulado.
IMDG	-	-	-	-	-	No regulado.
IATA	-	-	-	-	-	No regulado.

**PG:** Grupo de embalaje

No es un producto de transporte peligroso.  
Sensible a heladas desde -20 °C.  
Sensible al calor desde +40 °C.  
Mantener separado de los productos alimenticios.

## 15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

### Reglamento de la UE

La clasificación y el etiquetado se han determinado según las Directivas de la UE 67/548/CEE (REAL DECRETO 363/1995) y 1999/45/CE (REAL DECRETO 255/2003, incluidas las enmiendas) y tienen en cuenta el uso previsto del producto.

Aplicaciones industriales.

**Frases de riesgo** : Este producto no está clasificado de acuerdo con la legislación de la UE.

## 16. OTRA INFORMACIÓN

### Historial

Fecha de Impresión : 2009-06-09

Fecha de emisión : 2009-06-09

Fecha de la emisión anterior : 2009-01-09

Versión : 3

Indica la información que ha cambiado desde la edición de la versión anterior.

### Aviso al lector

*Las Indicaciones se basan en las Informaciones y experiencias actuales. La Hoja de Datos de Seguridad describe los productos según las normas de seguridad. Los datos siguientes no implican la garantía en de la composición, propiedades o función del producto.*

## ANEXO B. FICHA TECNICA RESINA LEWATIT MONOPLUS M500

# FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

**LANXESS**  
Enabling Chemistry

LEWATIT MonoPlus M 500

05274923

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O EL PREPARADO Y DE LA SOCIEDAD O EMPRESA

#### Identificación de la sustancia o el preparado

Nombre del producto : LEWATIT MonoPlus M 500  
Uso de la sustancia o del preparado : Intercambiadores de Iones, resinas y catalizadores  
Proveedor/Fabricante : LANXESS Deutschland GmbH, Industrial & Environmental Affairs  
51369 Leverkusen, Alemania,  
Núm. de Teléfono: +49 214 30 65109  
E-mail: [infosds@lanxess.com](mailto:infosds@lanxess.com)  
Teléfono de emergencia : 704.10.00.87 (Spain)

### 2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

El preparado no está clasificado como peligroso según la Directiva 1999/45/CE y sus enmiendas.  
Consulte la sección 11 para obtener una información más detallada acerca de los efectos sobre la salud y síntomas.

### 3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

Definición del producto (REACH) : Preparado

copolímero del estireno-divinilbenceno con grupos de trietilamonio en forma cloruro

Según los conocimientos actuales del suministrador, este producto no contiene ningún ingrediente peligroso en cantidades que deban ser mencionadas en esta sección, de acuerdo con las reglamentaciones de la UE o las reglamentaciones nacionales.

### 4. PRIMEROS AUXILIOS

#### Primeros auxilios

Inhalación : Trasladar a la persona afectada al aire libre. Mantenga a la persona caliente y en reposo. Si no hay respiración, ésta es irregular u ocurre un paro respiratorio, el personal capacitado debe proporcionar respiración artificial u oxígeno. Obtenga atención médica si se presentan síntomas. Si está inconsciente, coloque en posición de recuperación y consiga atención médica inmediatamente. Asegure una buena circulación de aire. Aflojar todo lo que pudiera estar apretado, como el cuello de una camisa, una corbata, un cinturón. En caso de inhalación de productos en descomposición en un incendio, los síntomas pueden aparecer posteriormente. Es posible que la persona expuesta tenga que estar bajo vigilancia médica por un periodo de 48 horas.

Fecha de emisión : 2008-07-17

Página: 1/7

<b>Ingestión</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> Lave la boca con agua. Transladar a la persona afectada al aire libre. Mantenga a la persona caliente y en reposo. Si se ha ingerido material y la persona expuesta está consciente, suminístrele pequeñas cantidades de agua para beber. Deje de proporcionarle agua si la persona expuesta se encuentra mal ya que los vómitos pueden ser peligrosos. No inducir al vómito a menos que lo indique expresamente el personal médico. Si vomita, mantener la cabeza baja de manera que el vómito no entre en los pulmones. Obtenga atención médica si se presentan síntomas. No suministrar nada por vía oral a una persona inconsciente. Si está inconsciente, coloque en posición de recuperación y consiga atención médica inmediatamente. Asegure una buena circulación de aire. Aflojar todo lo que pudiera estar apretado, como el cuello de una camisa, una corbata, un cinturón.
<b>Contacto con la piel</b>	: Lave con agua abundante la piel contaminada. Quitese la ropa y calzado contaminados. Obtenga atención médica si se presentan síntomas. Lavar la ropa antes de volver a usarla. Limpiar completamente el calzado antes de volver a usarlo.
<b>Contacto con los ojos</b>	: Enjuagar los ojos inmediatamente con mucha agua, levantando ocasionalmente los párpados superior e inferior. Verificar si la víctima lleva lentes de contacto y en este caso, retrárselas. Continúe enjuagando por lo menos durante 10 minutos. Obtenga atención médica si se produce irritación.

Consulte la sección 11 para obtener una información más detallada acerca de los efectos sobre la salud y síntomas.

## 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

### Medios de extinción

<b>Apropiado(s)</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> En caso de incendio, use agua pulverizada (neblina), espuma, productos químicos secos o CO <sub>2</sub> .
<b>No apropiado(s)</b>	: No se conoce ninguno.
<b>Peligros de exposición especiales</b>	: No existe un peligro específico de incendio o explosión.  En caso de incendio, aisle rápidamente la zona evacuando a todas las personas de las proximidades del lugar del incidente. No debe realizarse acción alguna que suponga un riesgo personal o sin una formación adecuada.
<b>Productos peligrosos de la combustión</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> Los productos de descomposición pueden incluir los siguientes materiales: óxidos de carbono óxido de nitrógeno
<b>Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios</b>	: Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva.

## 6. MEDIDAS EN CASO DE LIBERACIÓN ACCIDENTAL

<b>Precauciones personales</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> No debe realizarse acción alguna que suponga un riesgo personal o sin una formación adecuada. No deje que entre el personal innecesario y sin protección. Proporcione ventilación adecuada. Use equipo protector personal adecuado (vea sección 8). Riesgo de resbalarse en producto derramado.
--------------------------------	---

<b>Precauciones ambientales</b>	: Evite la dispersión del material derramado, su contacto con el suelo, el medio acuático, los desagües y las alcantarillas. Informe a las autoridades pertinentes si el producto ha causado contaminación medioambiental (alcantarillas, canales, tierra o aire).
<b>Gran derrame</b>	: Retire los envases del área del derrame. Evite que se introduzca en alcantarillas, canales de agua, sótanos o áreas reducidas. Vacíe o barra el material y colóquelo en un envase de desperdicio etiquetado. Elimine por medio de un contratista autorizado para la eliminación. Nota: Véase la sección 1 para información de contacto de emergencia y la sección 13 para eliminación de desechos.
<b>Derrame pequeño</b>	: Retire los envases del área del derrame. Vacíe o barra el material y colóquelo en un envase de desperdicio etiquetado. Elimine por medio de un contratista autorizado para la eliminación.

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

<b>Manipulación</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> Use equipo protector personal adecuado (vea sección 8). Deberá prohibirse comer, beber o fumar en los lugares donde se manipula, almacena o trata este producto. Las personas que trabajan con este producto deberán lavarse las manos y la cara antes de comer, beber o fumar. No ingerir. Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Consérvese en su envase original o en uno alternativo aprobado fabricado en un material compatible, manteniéndose bien cerrado cuando no esté en uso. Los envases vacíos retienen residuos del producto y pueden ser peligrosos.
<b>Almacenamiento</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> Consérvese entre las siguientes temperaturas: -20 a 40°C (-4 a 104°F). Conservar de acuerdo con las normativas locales. Almacenar en el contenedor original protegido de la luz directa del sol en un área seca, fresca y bien ventilada, separado de materiales incompatibles (ver sección 10) y comida y bebida. Mantener el contenedor bien cerrado y sellado hasta el momento de usarlo. Los envases abiertos deben cerrarse perfectamente con cuidado y mantenerse en posición vertical para evitar derrames. No almacenar en contenedores sin etiquetar. Utilícese un envase de seguridad adecuado para evitar la contaminación del medio ambiente.
<b>Materiales de embalaje</b>	
<b>Recomendado</b>	: Utilizar el contenedor original.
<b>Observaciones</b>	: <input checked="" type="checkbox"/> Tomar medidas de precaución contra la acumulación de cargas electrostáticas. No permita que se seque.

## 8. CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

<b>Valores límite de la exposición</b>	: No disponible.
<b>Procedimientos recomendados de control</b>	: Si este producto contiene ingredientes con límites de exposición, puede ser necesaria la supervisión personal, del ambiente de trabajo o biológica para determinar la efectividad de la ventilación o de otras medidas de control y/o la necesidad de usar equipo respiratorio protector. Se debe hacer referencia al Estándar europeo EN 689 por métodos para evaluar la exposición por inhalación a agentes químicos y la guía nacional de documentos

por métodos para la determinación de sustancias peligrosas.

#### Medidas de gestión de riesgos

##### Controles de la exposición profesional

**medidas técnicas** : No hay requisitos de ventilación especiales. Una ventilación usual debería ser suficiente para controlar la exposición del obrero a los contaminantes aerotransportados. Si este producto contiene ingredientes de exposición limitada, use cercamientos del proceso, ventilación local, u otros controles de Ingeniería para mantener la exposición del obrero por debajo de todos los límites recomendados o estatutarios.

##### equipo de protección personal

**Protección respiratoria** : Use un respirador purificador de aire o con suministro de aire, que esté ajustado apropiadamente y que cumpla con las normas aprobadas si una evaluación del riesgo indica es necesario. La selección del respirador se debe basar en el conocimiento previo de los niveles, los riesgos de producto y los límites de trabajo de seguridad del respirador seleccionado.

**Protección de las manos** : Guantes químico-resistentes e impenetrables que cumplen con las normas aprobadas deben ser usados siempre que se manejen productos químicos si una evaluación del riesgo indica que es necesario. Tras producirse contaminación con el producto, cambiar inmediatamente el guante y eliminarlo conforme a las normas.  
<1 horas (tiempo de detección): PVC , caucho nitrílico , policloropreno - CR

**Protección de los ojos** : Equipo protector ocular que cumpla con las normas aprobadas debe ser usado cuando una evaluación del riesgo indique que es necesario para evitar toda exposición a salpicaduras del líquido, lloviznas, gases o polvos.  
Recomendado: gafas de seguridad con protección lateral

**Protección cutánea** : Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista.

**Medidas higiénicas** : Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del periodo de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para remover ropa contaminada. Lavar las ropas contaminadas antes de volver a usarlas. Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

##### Controles de la exposición del medio ambiente

**medidas técnicas** : Emisiones de los equipos de ventilación o de procesos de trabajo deben ser evaluados para verificar que cumplen con los requisitos de la legislación de protección del medio ambiente. En algunos casos será necesario el uso de eliminadores de humo, filtros o modificaciones del diseño del equipo del proceso para reducir las emisiones a un nivel aceptable.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

### Información general

#### Apariencia

- Estado físico : Sólido. [perlas]  
 Color : Amarillo.  
 Olor : Como amina.

### Información importante en relación con la salud, la seguridad y el medio ambiente

- pH :  5 [Conc. (% p/p): 10%]  
 Densidad :  08 kg/L (20 °C)  
 Densidad aparente: :  90 kg/m<sup>3</sup>  
 Solubilidad :  soluble en los siguientes materiales: agua fría  
 Temperatura de ignición: : >250°C

## 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Estabilidad : El producto es estable.  
 Condiciones que deben evitarse : Separe de los materiales oxidantes. Evítase la acumulación de cargas electrostáticas.  
 Productos de descomposición peligrosos : En condiciones normales de almacenamiento y uso, no se deberían formar productos de descomposición peligrosos.

## 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

### Efectos agudos potenciales para la salud

#### Toxicidad aguda

Nombre del producto o ingrediente	Resultado	Especies	Dosis	Exposición	Prueba
<input checked="" type="checkbox"/> EWATIT MonoPlus M 500	DL50 Oral	* Rata	>2000 mg/kg	-	-

Resultados del ensayo con un producto análogo

#### Irritación/Corrosión

- Piel :  No irritante . Resultados del ensayo con un producto análogo .  
 Ojos :  No irritante . Resultados del ensayo con un producto análogo .

## 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

- Observaciones :  causa de la insolubilidad de la sustancia en agua, no existen datos acerca de su toxicidad en medio acuoso.

### 13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

- Métodos de eliminación** : Comprobar la reutilizabilidad. Los residuos de productos y los envases vacíos que contengan residuos se embalarán o cerrarán respectivamente, marcándose y disponiéndolos para su evacuación adecuada o su reutilización observando las normas locales vigentes. Tratándose de grandes cantidades, hablar con el proveedor. Al traspasar los envases vacíos sin limpiar, debe avisarse al usuario de los posibles peligros debido a restos del producto. Para su eliminación dentro de la CE, se debe utilizar el código apropiado según la Lista de Residuos Europeos (EWL). Es responsabilidad del generador asignar el residuo a los códigos residuales específicos para los sectores y procesos industriales, según la Lista Europea de Residuos (EWL).
- Residuos Peligrosos** : El proveedor no considera este producto como un residuo peligroso, en virtud de la Directiva de la UE 91/689/CE.

### 14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Regulación	Número ONU	Nombre y descripción	Clase	PG	Etiqueta	Información adicional
ADR/RID	-	-	-	-	-	No regulado.
GGVSE	-	-	-	-	-	No regulado.
ADNR	-	-	-	-	-	No regulado.
IMDG	-	☑	-	-	-	☑ No regulado.
IATA	-	☑	-	-	-	No regulado.

PG: Grupo de embalaje

No es un producto de transporte peligroso.  
Sensible a heladas desde -20 °C.  
Mantener separado de los productos alimenticios.

### 15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

#### Reglamento de la UE

La clasificación y el etiquetado se han determinado según las Directivas de la UE 67/548/CEE (REAL DECRETO 383/1996) y 1988/46/CE (REAL DECRETO 266/2003, incluidas las enmiendas) y tienen en cuenta el uso previsto del producto.

Aplicaciones industriales.

**Frases de riesgo** : Este producto no está clasificado de acuerdo con la legislación de la UE.

## 16. OTRA INFORMACIÓN



### Historial

Fecha de impresión : 2008-07-17  
Fecha de emisión : 2008-07-17  
Fecha de la emisión anterior : 2007-03-08  
Versión : 3

### Aviso al lector

*Las indicaciones se basan en las informaciones y experiencias actuales. La Hoja de Datos de Seguridad describe los productos según las normas de seguridad. Los datos siguientes no implican la garantía en de la composición, propiedades o función del producto.*

## ANEXO C. RESULTADOS PRUEBA PRELIMINAR AGUA RESIDUAL MINA SANTANDER

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b> <b>POST-ANALITICO</b>	Código: F-PA-02	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Versión: 05	
	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 3		



\*Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1699 de 2011, en los parámetros pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, Sulfatos, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales pesados en aguas y metales en muestras particuladas y compuestas\*



\*Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 5034 de 2010, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano\*



Informe de resultados No.	12-446	Fecha de emisión:	Septiembre 04 de 2012
Cliente:	FUNDACION ASOBIO		
Dirección del cliente:	Calle 101 No 22 A 29 Provenza		
Solicitud de servicio No.	12-388	No. de muestras:	01
Fecha de recepción de las muestras:	Julio 25 de 2012		
Muestras recibidas por:	Johanna Riveros		
Fecha de análisis:	Julio 25 de 2012 – Agosto 31 de 2012		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	12-388-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	Mina KM 4 E :1028235 N: 1180008		
Matriz de la muestra:	Agua Residual de una mina		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Landázuri Santander / Frente Minero		
Fecha del muestreo:	No Suministrado		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Sólidos Totales (mg /L)	3052	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Disueltos (mg /L)	702	Gravimétrico
pH (Unidades de pH)	2,75	Potenciométrico / SM 4500-H <sup>+</sup> B
Temperatura ( °C )	24,6	Termométrico / SM 2550 B
Turbiedad (NTU)	469,6	Nefelométrico / SM 2130 B
Color (UPC)	740	Espectrofotométrico/ SM 2120 B
Conductividad (µS/cm)	2810	Conductivimétrico/ SM 2510
Sulfatos ( mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L)	2631	Espectrofotométrico/ SM 4500 E
Aluminio (mg Al /L)	<L. D.	Absorción/Atómica
Hierro Total (mg Fe/L)	32,28	Espectrofotométrico / SM 3500-Fe
Nitratos (mg NO <sub>3</sub> /L)	0,398	Espectrofotométrico / SM 4500



Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222  
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009  
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/laci/> E-mail: [laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co](mailto:laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co)  
 Bucaramanga - Colombia

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. 12 - 446

Solicitud de servicio No. 12-385

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Nitritos(mg NO <sub>2</sub> /L)	0,012	Espectrofotométrico / SM 4500-B
Fosfatos (mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L)	0,35	Espectrofotométrico / SM 4500-P E
Cloruros (mg Cl/L)	74,52	Argentométrico / SM 4500-Cl B
Manganeso (mg Mn/L)	0,12	Absorción Atómica / SM 3111 B
Calcio (mg Ca/L)	21,98	Absorción Atómica / SM 3111 B
Magnesio (mg Mg/L)	2,65	Absorción Atómica / SM 3111 B
Sodio (mg Na/L)	10,24	Absorción Atómica / SM 3111 B
Potasio (mg K/L)	13,18	Absorción Atómica / SM 3111 B
Silicio (mg Si/L)	3,22	Espectrofotométrico/ SM 4500
Cinc (mg Zn /L)	0,16	Absorción Atómica / SM 3111 B
Cobalto (mg Co/L)	<L.D.	Absorción Atómica / SM 3111 B
Niquel (mg Ni /L)	<L.D.	Absorción Atómica / SM 3111 B

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/16 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. 12- 446                      Solicitud de servicio No. 12-386


Observaciones: *Ninguna*

**Nota 1:** Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

**Nota 2:** En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comuniqué con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:

  
Luz Yolanda Vargas Piatto  
Directora del Laboratorio  
Química, Msc. Química UIS  
MP PQ 1144

Elaboró: *Johanna Rivera*

## ANEXO D. RESULTADOS PRUEBA PRELIMINAR AGUA RESIDUAL MINA BOYACÁ

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/18 Página 1 de 3	

\*Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 2659 de 2011, en los parámetros pH, DRO, DOO, SST, fosfatos, SSM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y totes de cuarenta parámetros y computadores\*

\*Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 5534 de 2010, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos de aguas para consumo humano\*



Informe de resultados No.	12-356	Fecha de emisión:	Julio 16 de 2012
Cliente:	FUNDACION ASOBIO		
Dirección del cliente:	Calle 101 No 22 A 29 Provenza		
Solicitud de servicio No.	12-334	No. de muestras:	01
Fecha de recepción de las muestras:	Junio 22 de 2012		
Muestras recibidas por:	Johanna Riveros		
Fecha de análisis:	Junio 22 de 2012 – Julio 16 de 2012		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	12-334-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	Mina La Primavera		
Matriz de la muestra:	Agua Residual de la Salida de la mina		
Muestreo realizado por:	Alexander Sanmiguel		
Lugar y punto de muestreo:	Boyacá Via Socha / Frente Minero E :1158463 N: 1157473		
Fecha del muestreo:			

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Sólidos Totales (mg /L)	1960	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Disueltos (mg /L)	660	Gravimétrico
pH (Unidades de pH)	6,75	Potenciométrico / SM 4500-H <sup>+</sup> B
Temperatura (°C)	24,0	Termométrico / SM 2550 B
Turbiedad (NTU)	226	Nefelométrico / SM 2130 B
Color (UPC)	1250	Espectrofotométrico/ SM 2120 B
Conductividad (µS/cm)	2070	Conductivimétrico/ SM 2510
Sulfatos ( mg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L)	1219,5	Espectrofotométrico/ SM 4500 E
Aluminio (mg Al /L)	<L.D	Absorción Atómica
Hierro Total (mg Fe/L)	37,3	Espectrofotométrico / SM 3500-Fe
Nitratos (mg NO <sub>3</sub> /L)	0,090	Espectrofotométrico / SM 4500

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222  
 Comitador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009  
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lcp/> E-mail: [laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co](mailto:laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co)  
 Bucaramanga - Colombia



	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. 12-356

Solicitud de servicio No. 12-334

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Nitritos(mg NO <sub>2</sub> /L)	0,15	Espectrofotométrico / SM 4500-B
Fosfatos (mg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L)	0,51	Espectrofotométrico / SM 4500-P E
Cloruros (mg Cl/L)	13,2	Argentométrico / SM 4500-Cl' B
Manganeso (mg Mn/L)	2,49	Absorción Atómica / SM 3111 B
Calcio (mg Ca/L)	49,78	Absorción Atómica / SM 3111 B
Magnesio (mg Mg/L)	12,66	Absorción Atómica / SM 3111 B
Sodio (mg Na/L)	115,6	Absorción Atómica / SM 3111 B
Potasio (mg K /L)	4,20	Absorción Atómica / SM 3111 B
Silicio (mg SiO <sub>2</sub> /L)	0,037	Espectrofotométrico
Plomo (mg Pb /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Antimonio (mg Sb /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Cinc (mg Zn /L)	0,27	Absorción Atómica / SM 3111 B
Arsénico (µg As/l)	<L.D	Absorción Atómica/Generación de Hidruros / SM 3114 C
Bario (mg Ba /L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 D
Cadmio (mg Cd/L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Cromo (mg Cr/L)	<L.D	Absorción Atómica / SM 3111 B
Cobalto (mg Co/L)	0,12	Absorción Atómica / SM 3111 B
Níquel (mg Ni /L)	0,29	Absorción Atómica / SM 3111 B

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222  
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009  
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/oci/> E-mail: [laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co](mailto:laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co)  
 Bucaramanga - Colombia

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/16 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. 12-356 Solicitud de servicio No. 12-334

Observaciones: *Ninguna*

**Nota 1:** Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

**Nota 2:** En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

**Estimado cliente:** Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comuniquen con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:

  
Luz Yolanda Vargas Rialto  
Directora del Laboratorio  
Química, Mec Química UIS  
MP PQ 1144

Elaboró: *Johanna Rincón*