

Diversificación del uso industrial del yacimiento Río del Callejón: obtención de sulfato de aluminio para tratamiento de agua

Leonardo Rodríguez-Suárez
Alberto Hernández-Flores
Carmen Rodríguez-Acosta

Resumen

Con el objetivo de obtener sulfato de aluminio para su uso industrial como coagulante en el tratamiento de las aguas, se realizaron pruebas experimentales a escala de laboratorio con una muestra del yacimiento Río del Callejón perteneciente al municipio especial Isla de La Juventud, la muestra caracterizada desde el punto de vista químico y granulométrico fue sometida a un proceso tecnológico que tuvo como operaciones fundamentales la calcinación y la lixiviación con ácido sulfúrico. Para la realización de las pruebas tecnológicas se empleó el método de tamizado de Plackett – Burman, para lo que se tuvieron como variables independientes; temperatura de calcinación, tiempo de calcinación, temperatura de lixiviación, tiempo de lixiviación, velocidad de agitación, concentración de ácido y relación líquido sólido. Como resultados fundamentales del trabajo se obtuvo, el sulfato de aluminio con características apropiadas para ser empleado como sustancia coagulante para el tratamiento de aguas de consumo humano y de aguas residuales. Se confirmó mediante una corrida adicional en la cual se obtuvo aproximadamente un 17 % más del producto de interés, que las variables independientes de mayor influencia en el proceso de obtención del sulfato de aluminio, son: en primer lugar la temperatura de calcinación y en menor grado y en orden descendiente, la relación sólido / líquido y el tiempo de lixiviación.

Palabras clave: caolín; calcinación; diseño de Plackett–Burman; lixiviación ácida; sulfato de aluminio.

Diversification of the industrial use of the land river layer: obtaining aluminum sulfate for water treatment

Abstract

With the objective of obtaining aluminum sulphate to be used as a coagulant in the water treatment, experimental test works were conducted with a sample of the kaolin ore body Río del Callejón located in the special municipality of the Isle of Youth. The sample was characterized from the chemical and granulometric point of view and was subjected to a technological process with calcination and sulphuric acid leaching being the main operations. The Plackett–Burman screening design was used in the technological tests taking calcination temperature, calcination time, leaching temperature, leaching time, agitation velocity, acid concentration and liquid-solid ratio as independent variables. An aluminum sulphate with suitable characteristics to be used as a coagulant substance in water treatment (human consumption and residual) was obtained. The experimental results revealed that the aluminum sulphate obtained shows better quality than that of the one currently obtained in the industry using aluminum hydroxide.

Keywords: acid leaching; aluminum sulfate; calcination; kaolin; Plackett-Burman design.

1. INTRODUCCIÓN

Cuba posee depósitos minerales del grupo del caolín distribuidos en gran parte del territorio nacional entre los que se pueden señalar: Río del Callejón, Pino, Toño y Dumañuecos en la Isla de la Juventud; Mir en Holguín; Hortensia, Camagüey; Brooklyn y Santa Isabel de Pinar del Río, así como Gaspar y Bañadero, en Ciego de Ávila. Estos recursos han sido utilizados hasta el presente en lo fundamental para la industria cerámica, cosméticos y la industria del cemento (Batista –González *et al.* 2009). Los recursos minerales del yacimiento Río del Callejón se han utilizado fundamentalmente en la industria cerámica Fina y en menor grado en la cerámica especial, sin embargo en este depósito mineral se calculan reservas que en sus diferentes categorías de medidas, indicadas e inferidas suman cantidades cercanas a los 40 000 000 de toneladas, con contenidos promedios de óxido de aluminio (Al_2O_3) de 32,2% y de óxido de hierro (Fe_2O_3), de 2,4% (ONRM 2008).

Es conocido además que la industria química cubana requiere de producir grandes cantidades de sulfato de aluminio para el tratamiento de las aguas, ya sea en los acueductos, o las aguas residuales. Según la Oficina Nacional de Estadística en el período comprendido en los años 2006 al 2015, se dio tratamiento al 95,7% del agua suministrada a los acueductos, al mismo tiempo que se trató el 34,1 % de las aguas residuales (ONEI 2016).

El sulfato de aluminio es el coagulante tradicional que se utiliza a escala mundial para el tratamiento de las aguas, en Cuba se obtiene este producto a partir del hidróxido de aluminio, que se importa y del ácido sulfúrico de producción nacional. A pesar de ello, el país no logra cubrir el 100 % de la demanda de este producto químico para el tratamiento tanto del agua potable como de aguas residuales, esto hace que en las comunidades rurales y aquellas que se abastecen de fuentes de fácil acceso, se realice el consumo de agua sin el tratamiento químico requerido (Rodríguez *et al.* 2005).

Por las razones expuestas se realiza este trabajo de investigación que tiene como objetivo obtener sales de aluminio a partir de recursos minerales del yacimiento Río de Callejón en la Isla de la Juventud, para el tratamiento de las aguas de consumo y residuales en el territorio nacional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como proceso fundamental para la obtención del sulfato de aluminio se utilizó la lixiviación con ácido sulfúrico. Esta operación unitaria, que resulta una de las más antiguas empleada en la industria química, y fundamental en la hidrometalurgia, tuvo como factores principales a controlar los

siguientes: (i) solvente a utilizar; (ii) temperatura del proceso, y (iii) tratamiento previo que se le realiza al sólido (Treybal 1990).

Para la realización de las pruebas se utilizó una muestra del yacimiento Río del Callejón, los resultados del análisis químico y granulométrico se exponen en la tabla 1. Las características del ácido sulfúrico empleado en la lixiviación, procedente de la Empresa Rayonitro se muestran en la tabla 2.

Tabla1. Composición química y granulométrica de la muestra

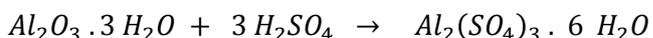
Ensayo	Contenido, %
SiO ₂	54,69
Al ₂ O ₃	23,32
Fe ₂ O ₃	0,56
MgO	0,021
CaO	No detectable
K ₂ O	1,43
Na ₂ O	7,63
PPI	10,42
pH	5,70
H ₂ O	1,65
Granulometría > 60 mesh	10,50
De 60 mesh a 200 mesh	32,50
< 200 mesh	57,00

Tabla 2. Caracterización del ácido sulfúrico técnico empleado en la lixiviación

Ensayos	Resultados
Acidez total como H ₂ SO ₄	97,96 %
Hierro	10,65 mg/L
Cobre	0,6 mg/L
Níquel	5,85 mg/L
Residuo fijo por ignición	0,014 %
Densidad	1,843 g/mL a 20 °C
Sustancias reductoras al permanganato	0,001 %

La calcinación se realizó en una mufla Furnace 6000, Barnstead Thermolyne con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Para el filtrado de los cristales se utilizó un embudo con el papel de filtro F - 2041, a una presión de vacío de -0,6 bar, y se terminó de secar a temperatura ambiente.

La reacción entre el ácido sulfúrico y el óxido de aluminio presente en el caolín, se desarrolla según la siguiente ecuación:



Se utilizó un agitador magnético marca Thermo Scientific Cimarec™ Stirring Hot Plates, donde se regula la temperatura y la velocidad de agitación. Se empleó un termómetro de mercurio para verificar la temperatura real de la mezcla: agua, ácido sulfúrico y caolín.

De acuerdo a la literatura consultada (Buenrostro 2003; Torres–Janneth, Castelló & Vizcayo 2011 y Velásquez & Vélez 2014) se seleccionaron las variables y sus respectivos niveles (Tabla 3).

Tabla 3. Variables independientes a considerar en el diseño de lixiviación del caolín y el ácido sulfúrico

Factores	Bajo	Alto	Unidades
Temperatura de calcinación	25,0	700,0	°C
Tiempo de calcinación	60,0	120,0	min
Temperatura de lixiviación	80,0	105,0	°C
Tiempo de lixiviación	60,0	120,0	min
Velocidad de agitación	350	612	rpm
Concentración de ácido	11,7	29,2	% en peso
Relación sólido/líquido	4,0	6,0	Relación 1:4/1:6

Para determinar la influencia de las variables independientes, se elaboró una matriz de experimentos según el método de tamizado Plackett–Burman empleando el software estadístico Statgraphics Centurión XVI como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz del diseño de experimento de Plackett – Burman codificado, con sus valores reales entre paréntesis, empleado en la lixiviación ácida del caolín

Corrida	Temperatura de calcinación, °C	Tiempo calcinación, minutos	Temperatura lixiviación, °C	Tiempo lixiviación, minutos	Velocidad agitación, rpm	Concentración de ácido, %	Relación sólido / líquido
1	1(700)	-1 (60)	-1 (80)	-1 (60)	1 (612)	1 (19,95)	1 (6)
2	-1(25)	-1 (60)	-1 (80)	-1 (60)	-1 (350)	-1 (17,50)	-1 (4)
3	-1 (25)	-1 (60)	1 (105)	1 (120)	1 (612)	-1 (11,45)	1 (6)
4	-1 (25)	1 (120)	1 (105)	-1 (60)	1 (612)	-1(17,38)	-1 (4)
5	1 (700)	1 (120)	1 (105)	-1 (60)	1 (612)	1 (28,97)	-1 (4)
6	1 (700)	-1 (60)	1 (105)	1 (120)	-1 (350)	1 (29,06)	-1 (4)
7	1 (700)	1 (120)	-1 (80)	1 (120)	1 (612)	-1 (11,88)	1 (6)
8	-1 (25)	1 (120)	-1 (80)	-1 (60)	-1 (350)	1 (19,24)	1 (6)
9	1 (700)	-1 (60)	1 (105)	-1 (60)	-1 (350)	-1 (12,17)	1 (6)
10	-1 (25)	-1 (60)	-1 (80)	1 (120)	1 (612)	1 (28,87)	-1 (4)
11	1 (700)	1 (120)	-1 (80)	1 (120)	-1 (350)	-1 (17,45)	-1 (4)
12	-1 (25)	1 (120)	1 (105)	1 (120)	-1 (350)	1 (19,14)	1 (6)

* La concentración reflejada es la valorada por titulación ácido – base con hidróxido de sodio antes de iniciar la lixiviación.

2.1. Características geológicas del yacimiento Rio del Callejón

Desde el punto de vista genético los depósitos de caolines en Cuba se corresponden con los siguientes tipos:

De meteorización residuales: Se asocian a los depósitos eluvio–deluviales desarrollados a expensa de la meteorización de secuencias de esquistos metaterrígenos (*PJ*) y de los granitoides (*K2*). En su composición predomina la caolinita, con contenidos variables de cuarzo y montmorillonita e impregnaciones de óxido férrico. Forman capas irregulares de un espesor útil promedio de 10 m – 20 m y lentes de tamaño variable con espesor de 10 m. En todos los casos se observan en el corte relictos de la roca madre o lentes de arena cuarzosa y arcillas rojas, además de bloques de cuarcita.

Hidrotermales: Se forman debido a la alteración de las rocas vulcanógenas de composición media–ácida (*K2cn – cp*) y de los granitoides (*K2*). En ellos predomina la caolinita, con contenidos variables de montmorillonita; forman

capas alargadas y lentes de espesores irregulares, distribuidas de modo diferente en el corte de la secuencia vulcanógena. También se presentan como manifestaciones de arcillas caoliníticas de color blanco, blanco-rojizo, abigarradas y hasta gris oscuro. A veces en la superficie se asocian a concreciones ferruginosas y cuarzo derivado de vetas. También aparecen arcillas caoliníticas refractarias y semi-refractarias, así como andesitas caolinizadas.

El yacimiento Río del Callejón es un depósito del tipo de meteorización, está constituido por tres componentes básicos: Río del Callejón (cemento blanco), Río del Callejón (mina vieja) y Río del Callejón (*BB – 1*) con sus calidades correspondientes (Batista-González *et al.* 2009).

Esta materia prima mineral caolinítica en su composición mineralógica general contiene caolinita, cuarzo, feldespato, limonita, montmorillonita, minerales de hierro, oro nativo, pirita, micas, clorita, goethita, dickita, zunyita, hematita y sericita.

En la tabla 5 se pueden apreciar las cantidades del recurso por categoría según el Balance Nacional.

Tabla 5. Recursos del yacimiento Río del Callejón (según BNRR de 2008)

Categoría	Recursos en 10 ³ t	Contenidos (%)	
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Medido	9 680,019	31,34	1,95
Indicado	14 230,364	32,66	2,64
Inferido	13 625,497	32,79	2,68

Se calcinó a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min partiendo de la temperatura ambiente hasta llegar a la temperatura prefijada de 700 °C. Una vez llegado al tiempo prefijado, se apagaba la mufla y se dejaba enfriar hasta el día siguiente.

La reacción de lixiviación se llevó a cabo en un beaker de 1000 mL, los reaccionantes se agregaban en el siguiente orden: el agua, el ácido sulfúrico; se calentaba hasta llegar a la temperatura indicada en cada corrida y manteniendo la agitación constante, se agregaba la totalidad de los 50 gramos de caolín. El tiempo de reacción se comenzó a contar a partir de haber finalizado la adicción del sólido en cada corrida experimental. Para mantener el nivel del líquido y a su vez, la relación sólido/líquido constante durante todo el tiempo que duraba la reacción, se agregaba agua del grifo cada quince minutos aproximadamente, manteniendo el volumen inicial antes de comenzar la reacción.

El esquema tecnológico que se utilizó en los experimentos, sobre cuya base se realizaron las pruebas experimentales, se muestra en la Figura 1.

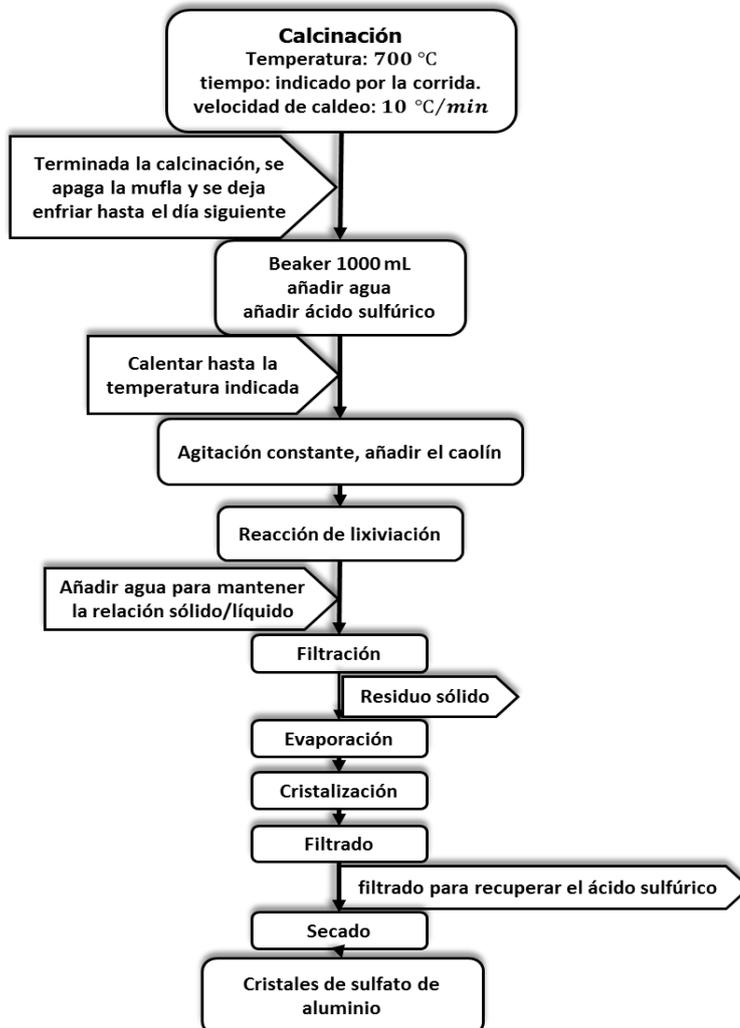


Figura 1. Esquema tecnológico empleado en los experimentos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 6 se observan los valores decodificados del diseño, así como los valores obtenidos de la variable respuesta. Resulta significativa la influencia de la temperatura de calcinación en la reacción de lixiviación a 700 °C, por el contrario, cuando ocurre la reacción a temperatura ambiente, la obtención de sal es prácticamente despreciable. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por otros autores que plantean que la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad. Esta alta reactividad hace que sea más soluble el caolín y que las cantidades de aluminio disuelto sean mayores, tanto en medio ácido como en medio alcalino (Galán-Liberto 1986; García-Colina 1995).

Tabla 6. Diseño de experimento de Plackett – Burman con la variable respuesta, peso de los cristales

Corrida	Concentración de ácido, %			Peso de los cristales, de Sulfato de Aluminio (g)
	concentración real, % *	Cantidad ácido, (g)	Cantidad de agua, (g)	
1	19,95	58,3	241,7	41,42
2	17,5	34,98	165	1,51
3	11,45	34,98	265	7,07
4	17,38	34,98	165	6,04
5	28,97	58,3	141,7	33,27
6	29,06	58,3	141,7	42,28
7	11,88	34,98	265	49,58
8	19,24	58,3	241,7	3,94
9	12,17	34,98	265	51,11
10	28,87	58,3	141,7	8,45
11	17,45	34,98	165	37,9
12	19,14	58,3	241,7	9,77

* La concentración reflejada es la valorada por titulación ácido – base con hidróxido de sodio antes de iniciar la lixiviación.

En la Figura 2 que expone el Diagrama de Pareto Estandarizado para la variable respuesta peso de los cristales, en el diseño de Plackett – Burman se corrobora la marcada influencia de la temperatura de calcinación en la obtención del sulfato de aluminio, es decir, se favorece la obtención del producto con una mayor temperatura de tratamiento térmico del caolín. Está marcada influencia de la temperatura de calcinación está dada por el efecto que tiene ésta en la estructura cristalina del caolín, pues entre los 500 – 900 grados Celsius, ocurre la deshidroxilación, es decir, la eliminación de agua de cristalización acompañada de una desaparición progresiva de la cristalización. El producto que se obtiene es un material amorfo con un alto grado de reactividad (Galán 1986; García-Colina 1995).

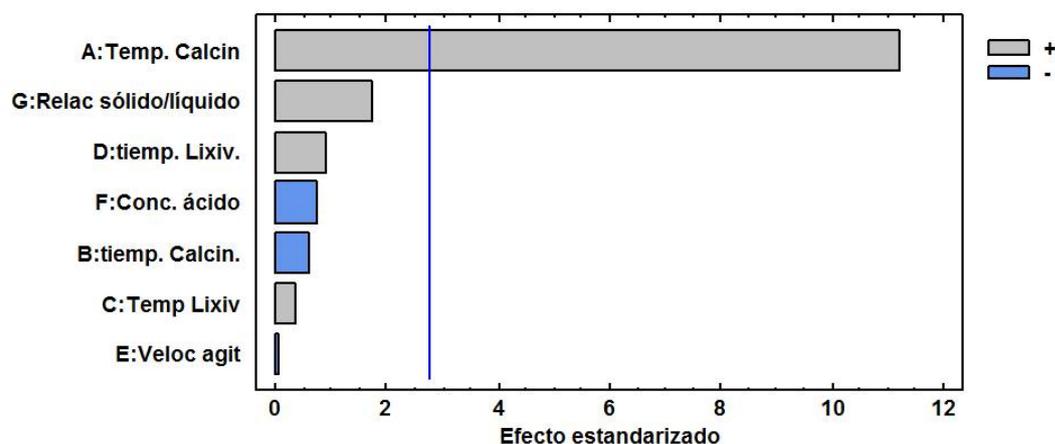


Figura 2. Diagrama de Pareto Estandarizado para la variable respuesta peso de los cristales, en el diseño de Plackett - Burman.

La relación sólido/líquido y el tiempo de lixiviación tienen menor influencia en la variable respuesta, no obstante, se beneficia la obtención del sulfato de aluminio cuando ambas se encuentran en su máximo valor. La concentración del ácido, tiene menor influencia en la respuesta, pero favorece a ésta cuando está en su valor mínimo.

El tiempo de calcinación tiene aún menor influencia en la variable respuesta, favoreciéndola con el valor mínimo, es decir, con un tiempo de tratamiento de 60 minutos, coincidiendo con lo reportado, donde la pérdida de cristalinidad, y por ende la facilidad de extraer el aluminio, mantiene una estrecha relación, al menos, hasta el momento en que se destruye el arreglo cristalino en el caolín. A partir de este instante se mantiene constante la pérdida de cristalinidad (Buenrostro 2003).

El comportamiento de las variables temperatura de lixiviación y velocidad de agitación, tienen menor efecto sobre la respuesta, pero esta se favorece cuando la temperatura de lixiviación está en su nivel más alto, La velocidad de agitación no influye en la respuesta.

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

Peso de cristales

$$\begin{aligned}
 &= 24,3617 + 18,2317 * \text{Temp. Calcin} - 0,945 \\
 &* \text{tiemp. Calcin.} + 0,561667 * \text{Temp Lixiv} + 1,48 \\
 &* \text{tiemp. Lixiv.} - 0,0566667 * \text{Veloc agit} - 1,17333 * \text{Conc. ácido} \\
 &+ 2,78667 * \text{Relac sólido/líquido}
 \end{aligned}$$

El análisis de varianza para las variables independientes del diseño se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Análisis de varianza para las variables independientes del diseño Plackett – Burman desarrollado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura Calcinación	3988,72	1	3988,72	125,72	0,0004
B:tiempo Calcinación	10,7163	1	10,7163	0,34	0,5923
C:Temperatura Lixiviación	3,78563	1	3,78563	0,12	0,7472
D:tiempo Lixiviación	26,2848	1	26,2848	0,83	0,4142
E:Velocidad agitación	0,0385333	1	0,0385333	0,00	0,9739
F:Concentración ácido	16,5205	1	16,5205	0,52	0,5105
G:Relación sólido/líquido	93,1861	1	93,1861	2,94	0,1617
Error total	126,906	4	31,7265		
Total (corr.)	4266,16	11			

R-cuadrada = 97,0253 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 91,8195 por ciento

Error estándar del est. = 5,63263

Error absoluto medio = 2,82944

Estadístico Durbin-Watson = 2,33898 (P=0,6865)

En la ecuación ajustada para el modelo, se aprecia una concordancia con lo analizado anteriormente de acuerdo al gráfico de pareto estandarizado. Según esta ecuación los coeficientes de mayor valor después del correspondiente a la temperatura de calcinación son: el coeficiente de la relación sólido/líquido y el coeficiente del tiempo de lixiviación.

Teniendo en consideración lo anterior, se hace una corrida adicional, donde se aumenta el tiempo de lixiviación a 180 minutos, con los valores de las otras variables independientes iguales. El valor de la variable respuesta, peso de los cristales, en estas condiciones fue de 60 gramos de sulfato de aluminio, este valor representa cerca del 17 % más del máximo valor alcanzado en la corrida 9 del diseño (51,11 gramos de sulfato de aluminio).

Como resultado de la prueba tecnológica con la muestra del yacimiento Río del Callejón se puede aseverar que los cristales de sulfato de aluminio obtenidos de la lixiviación del caolín de Río del Callejón con ácido sulfúrico, son blancos. De las 12 corridas experimentales en seis, la lixiviación produjo la sal de interés en cantidades significativas que resultan de interés práctico. La tabla 8, expone las corridas y los análisis llevados a cabo según

la norma cubana NC 387: 2005. *Productos químicos para uso industrial. Sulfato de aluminio.*

Tabla 8. Análisis del sulfato de aluminio obtenido en las diferentes corridas, según la NC 387: 2005. Productos químicos para uso industrial. Sulfato de aluminio

No. corrida	alúmina total soluble (Al_3O_2), %	hierro total soluble en agua (Fe_3O_2), %	Acidez libre como (H_2SO_4), %	Materia insoluble, %
2	23,41	0.036	25.68	-
3	22,52	0.007	31.33	-
5	21,18	0.055	24.90	-
9	23,71	0.065	24.73	-
9	24,35	0.012	23.31	-
11	24,45	0.005	26.54	-
NC 387:2005 Terrón o en grano grado técnico	Mínimo, 17 %	0.75, sobre la base de 17 % Al_3O_2	Acordado entre cliente y proveedor	Máximo 0.5
Referencia ¹	Mínimo, 17 %	0.2 – 0.4	0.5 – 2.0	Máximo 0.5

¹ Sulfato de aluminio obtenido actualmente en la planta industrial.

De la tabla 8, se puede observar que los valores de óxido de aluminio, están por encima del mínimo estipulado por la norma cubana. Los valores de hierro total soluble en agua, se encuentran muy por debajo del indicado en la misma, lo cual permitiría usar este producto en aplicaciones adicionales a las del tratamiento de agua, en la industria del papel, por ejemplo. La acidez libre, en forma de ácido sulfúrico, es un parámetro a consultar, pues como indica la norma, habría que conciliar con el cliente para determinar si acepta el producto con este valor.

Para comparar el producto obtenido, se toma como referencia los valores del sulfato de aluminio que produce actualmente la industria en el país a partir de la reacción entre el hidróxido de aluminio y el ácido sulfúrico. Exceptuando el valor de la acidez libre, los valores obtenidos son similares.

4. CONCLUSIONES

- El sulfato de aluminio obtenido cumple con los valores normados para ser utilizado como producto químico en el tratamiento de aguas de consumo humano y de aguas residuales. Los resultados experimentales indican que el sulfato de aluminio que se obtiene a partir el yacimiento Río del Callejón presenta indicadores de calidad

superiores al sulfato de aluminio que se obtiene hoy en la industria a partir del hidróxido de aluminio.

- La temperatura de calcinación resulta la variable de mayor influencia en el peso de los cristales de sulfato de aluminio. Las variables relación líquido/sólido y tiempo de lixiviación a pesar de no resultar significativas desde el punto de vista estadístico, con el aumento de ambas se favorece el peso de los cristales de sulfato de aluminio.
- Los mejores resultados se obtienen con las siguientes condiciones de operación:
 - Temperatura Calcinación: 700 °C
 - Relación sólido/líquido: 1:6
 - Tiempo de lixiviación: 180 minutos
 - Concentración ácido: 12,17 %
 - Tiempo Calcinación: 60 min
 - Temperatura Lixiviación: 105 °C
 - Velocidad agitación: 350 rpm

5. REFERENCIAS

- BATISTA-GONZÁLEZ ET AL. 2009: Información reducida INFOYAC, para la recopilación de datos de los yacimientos Río del Callejón y Dumañuecos. INFOYAC® – Sistema Informativo para los Recursos Minerales de Cuba. Marca Registrada.
- BUENROSTRO, J. F. 2003: *Estudio del proceso de obtención de amonoalunita a partir de caolín para su transformación a alúmina*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Consultado: 14 jul 2016. Disponible en: <http://www21169.cnki6.com/tesiuami/UAMI10795.pdf>
- GALÁN, LIBERTO DE PABLO. 1986: Solubilidad de la metacaolinita y de caolinita en medio ácido *Revista mexicana de ciencias geológicas* 6(2): 163–170. Consultado: 14 oct 2016. Disponible en: <http://www.biblioteca.org.ar/libros/91285.pdf>
- GARCIA COLINA, FERNANDO. 1995: Procesos industriales de acondicionamiento del caolín para su utilización como materia prima en la síntesis de zeolita X. [en línea]. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Química. Departamento de ingeniería química y metalúrgica. Unversidad de Barcelona, [fecha de consulta: 29 de junio de 2016]. Disponible en: http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35418/15/06.FGC_1de10.pdf

- OFICINA NACIONAL DE RECURSOS MINERALES (ONRM). 2008: Balance Nacional de Recursos Minerales.
- RODRÍGUEZ, S.; MUÑOZ, R.; GARCÍA, O. & FERNÁNDEZ, E. 2005: Empleo de un producto "Coagulante Natural para Clarificar Agua". *Revista CENIC Ciencias Químicas* 36 (Especial). Consultado: 31 mar 2016. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1816/181620511037.pdf>
- SERVICIOS INFORMATIVOS DE LA OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN (ONEI). 2016. Disponible en: <http://www.onei.cu/servicios%20informativos.htm>
- TORRES-JANNETH, R.; CASTELLÓ, R. & VIZCAYO, C. 2011: Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 31(1): 35-43. Consultado: 26 jun 2016. Disponible en: <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/download/39/100>
- TREYBAL, E. R. 1990: Lixiviación. En: *Operaciones de transferencia de masas*. Segunda Edición. McGraw-Hill, México.
- VELÁSQUEZ, S. & VÉLEZ, D. 2014: *Diseño conceptual de una planta para la producción de sulfato de aluminio a partir de bauxita*. Tesis de grado. Universidad EAFIT. Consultado: 10 jun 2016. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/5392>

Leonardo Rodríguez-Suárez, leonardo@inor.ciiq.minem.cu

M. Sc. Especialista en Investigaciones de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas
La Habana, Cuba

Alberto Hernández- Flores, alberto@inor.ciiq.minem.cu

Dr. C. Profesor Titular. Especialista en Investigaciones de Ciencia Tecnología y medio Ambiente
Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas
La Habana, Cuba

Carmen Rodríguez-Acosta, carmen@inor.ciiq.minem.cu

M Sc. Investigadora Auxiliar. Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas
La Habana, Cuba