

Blanqueo de caolín por medio de lixiviación en pilas con ácido oxálico

Bleaching kaolin by heap leaching with oxalic acid.

Branqueamento de caulim por lixiviação em pilhas com ácido oxálico

Manuel Julián Barros-Daza¹, Pablo Bustamante-Baena², Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa³

Forma de citar: M. J. Barros-Daza, P. Bustamante-Baena, M. O. Bustamante-Rúa, “Blanqueo de caolín por medio de lixiviación en pilas con ácido oxálico”, *Respuestas*, vol. 21, no. 1, pp. 65-76, 2016.

Recibido:
Junio 11 de 2015

Aceptado:
Agosto 27 de 2015

Resumen

Se estudiaron los resultados experimentales de lixiviación en pilas para el blanqueo del caolín a escala de laboratorio basados en un desarrollo teórico. El **objetivo** principal fue evaluar la remoción de óxidos de hierro sobre la superficie del caolín, **Método** con el uso de diferentes concentraciones de ácido oxálico en un tiempo de 48 días. **Resultado.** El índice de blancura del caolín de alimento fue del 52.1%, con porcentajes de hierro del 0.19%. A partir de los ensayos experimentales, **Conclusión** los resultados mostraron que para las concentraciones de 0.15M, 0.015M y 0.95M, las remociones de hierro fueron alrededor del 72.2%, 26.7%, 90.8% y los índices de blancura obtenidos fueron de 90.2%, 83.8% y 97% respectivamente.

Palabras clave: Acido Oxálico, Blanqueo de Caolín, Hidrometalurgia, Lixiviación en pilas, Óxidos de hierro.

Abstract

The experimental results of leaching were studied in batteries for bleaching kaolin scale development based on a theoretical laboratory. The main **objective** was to evaluate the removal of iron oxides on the surface of kaolin, **Methods:** the use of different concentrations of oxalic acid drip for 48 days in each heap. **Results:** The whiteness index of feed Kaolin is 52.1%, with an iron content of 0.19%. **Conclusions:** The results showed that for acidic concentrations 0.15M, 0.015M and 0.95M, the iron removed was approximately 72.2%, 26.7%, 90.8% and the whiteness index rose to 90.23%, 83.8%, and 97% respectively.

Key words: Oxalic Acid, Bleaching Kaolin, Hydrometallurgy, Heap leaching, Iron Oxides.

Resumo

Estudaram-se os resultados experimentais de lixiviação por pilha para o branqueamento do caulim a escala de laboratório, baseados num desenvolvimento teórico. **Objetivo:**

¹Ingeniero de Minas y Metalurgia
mjbarrosd@unal.edu.co
Orcid: 0000-0002-3481-4331
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia.

²Ingeniero de Minas y Metalurgia
pabustamanteba@unal.edu.co
Orcid: 0000-0002-8409-5531
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia.

³Doctor en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva
mobustam@unal.edu.co
Orcid: 0000-0002-1692-991X
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia.

avaliar a remoção de óxidos de ferro sobre a superfície do caulim. **Método:** usaram-se diferentes concentrações de ácido oxálico num tempo de 48 dias. **Resultado:** A partir dos ensaios experimentais se obteve que o índice de branquura do caulim de alimento foi do 52.1%, com porcentagens de ferro do 0.19%. **Conclusão:** os resultados mostraram que para as concentrações de 0.15M, 0.015M e 0.95M, as remoções de ferro foram em torno de 72.2%, 26.7% e 90.8% e os índices de branqueamento obtidos foram de 90.2%, 83.8% e 97.0%, respectivamente.

Palavras-chave: Acido Oxálico, Branqueamento do Caulim, Hidrometalurgia, Lixiviação por pilhas, Óxidos de ferro.

1. Introducción

El caolín es una roca compuesta principalmente por minerales del grupo de la caolinita, que presenta una composición química de silicato de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), originándose debido a la meteorización de rocas feldespáticas y micas presentes en pegmatitas y esquistos micáceos [1].

El caolín juega un papel importante a nivel industrial, ya que presenta múltiples características beneficiosas que mejoran las propiedades de algunos materiales como son: químicamente inerte, buen poder de recubrimiento, poco abrasivo, opacidad cuando se utiliza como pigmento, inodoro, aislante eléctrico, moldeable, no tóxico y resistente a altas temperaturas [2].

Algunas aplicaciones industriales donde encontramos la presencia de caolín son: en la fabricación de pinturas (pigmentos de extensión), cerámicos (sanitarios, tejas de alto grado, vajillas, objetos de baños etc.) papel, refractarios, cemento y cosméticos [3].

El índice de blancura es la principal exigencia para la aplicación a nivel industrial de arcillas caolínicas, convirtiéndose la blancura en un valor agregado. Es por esto que altas reservas de caolín no pueden ser utilizadas para aplicaciones industriales, debido a las limitaciones que presentan en lo que respecta al índice de blancura que poseen. Por ejemplo, en el caso de la fabricación de papel, el caolín requiere una blancura superior al 80%, dependiendo del tipo y calidad del papel. Para

la utilización del caolín en cerámicos se exige una blancura del orden del 78-83% y del 75-80% en el producto de loza para baño. Para el caso de la fabricación de pinturas se requieren una blancura del 83% [4].

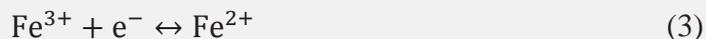
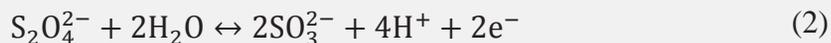
La causa principal que afecta la blancura del caolín son la presencia de contaminantes adheridos sobre la superficie como: óxidos de hierro (Hematita), Hidróxidos de hierro (goethita-lepidocrocita) y óxidos hidratados de hierro férrico, dándole una coloración al caolín de anaranjada hasta rojiza. Presencia de hasta 0.4% de hierro férrico en el caolín son suficientes para darle coloración a depósitos caoliniticos [5]. La Tabla I muestra la mineralogía de los principales minerales de fierro ("Fe-bearing") en las arcillas que aportan color.

Tabla I. Minerales tipo "Fe-bearing" que aportan color a arcillas.

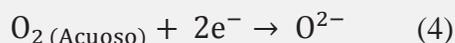
Mineral	Estructura
Anatasa	TiO_2
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Hematita	Fe_2O_3
Ilmenita	FeTiO_3
Magnesita Titanífera	$\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$

Fuente: [6]

El proceso industrial actual para el blanqueo de caolín consiste en la disolución selectiva del ion férrico (Fe^{3+}) en una solución ácida con pH del orden de 1.0 en (1) y posterior reducción con ditonito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), como se indica en la (2) y (3) [6].



A pesar de las condiciones de acidez y la presencia adecuada de ditonito de sodio, la reacción de reducción del ion férrico / es fuertemente reversible generando un proceso de blanqueo altamente ineficiente [7]. Dicha reversibilidad es asociada a una reacción competencia, producto de la reducción del oxígeno disuelto en el agua en (4) incrementando los potenciales de concentración de hidrosulfito para alcanzar los niveles de blanqueo que industrialmente se requieren [6],[7] .



Esta competencia la relacionó [7] con la aparición de precipitados de Fe en forma de



Por lo tanto el presente trabajo experimental tiene como objetivo estudiar y evaluar el blanqueamiento de caolín a través del método de lixiviación en pilas usando ácido oxálico en diferentes concentraciones. Dicho estudio y evaluación se centrará en la comparación de los índices de blancura de entrada y salida del caolín. Evidenciando que los resultados de este nuevo proceso reducen las fuertes condiciones ácidas de los procesos clásicos y la reversibilidad de la reducción de ion férrico, además disminuye la reacción competencia del oxígeno disuelto en el agua.

2. Materiales y métodos

2.1 Muestra de caolín

El caolín utilizado es de una mina localizada en el Municipio de La Unión, Antioquia, ubicado aproximadamente a 35 km del sureste de la ciudad de Medellín [9].

sulfatos hidratados de hierro y jarositas que vuelven a dar coloración a los minerales de arcilla que han sido blanqueados.

Además, este proceso genera demasiados riesgos bajo la mirada de las actuales regulaciones ambientales y de desarrollo minero sostenible, por lo que se hace indispensable implementar nuevas técnicas, con menor consumo de agua y energía

Por otro lado, [8] reporta que algunos ácidos débiles forman complejos selectivamente con los iones de Fe, como el caso del ácido oxálico que al combinarse el ion oxalato con el hierro, se forma el oxalato de hierro como complejo en medio acuoso en (5).

En orden de caracterizar la muestra de caolín, la técnica usada para cuantificar las fases cristalinas fue la de Difracción de Rayos X (DRX) (Siemens, D5000). Para cuantificar la cantidad inicial de hierro en el mineral caoliniticos y posterior caracterización de las soluciones acuosas de descarga, se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica (Thermoscientific, Ice 3 000®) equipado con una lámpara de cátodo hueco de hierro. Para la caracterización de la distribución de tamaño de partícula del caolín se utilizó un medidor de distribución de tamaño de partícula tipo laser MasterSize 2,000E®.

2.2 Lixiviación en Pilas (“heap leaching process”)

Una técnica implementada para menas de bajo tenor ha sido la lixiviación en pilas. Dicha técnica reduce notablemente el consumo

de energía y la intensidad de los procesos de separación sólido-líquido en las plantas metalúrgicas [10].

La Figura 1 muestra un esquema del proceso de lixiviación en pilas (“Heap leaching”) que en la actualidad se usa para la explotación de minerales de cobre, oro y uranio principalmente. Sin embargo a pesar de las garantías, esta técnica presenta serios inconvenientes cuando las menas poseen altos porcentajes de arcillas, para lo cual se ha desarrollado un pretratamiento con el fin de eliminar este efecto, mediante la aglomeración del mineral.

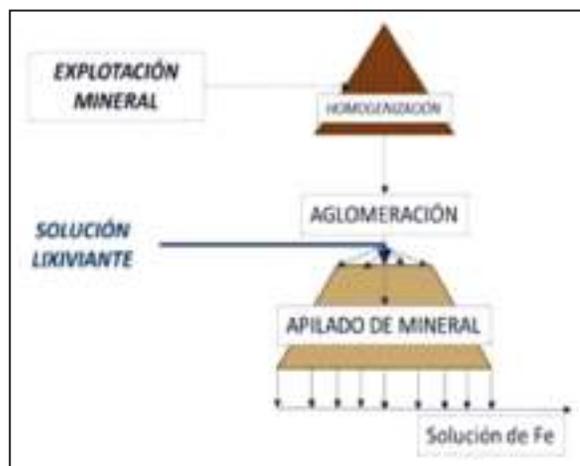


Figura 1. Esquema de proceso de lixiviación en pilas
Fuente: [10]

2.3 Montaje experimental

El proceso experimental se llevó a cabo en tubos de acrílico de 1 metro de largo y 0.12 metro de diámetro. Previamente se realizó un pretratamiento del mineral para la producción de glómeros. En la parte superior de los tubos de acrílico se instaló un rociador, que permitió regular el caudal de la solución de Ácido oxálico goteada a la pila del mineral. En la parte inferior de la pila se instaló un dispositivo de descarga que conducía la solución rica en hierro hasta un tanque para su almacenamiento (ver Figura 2).

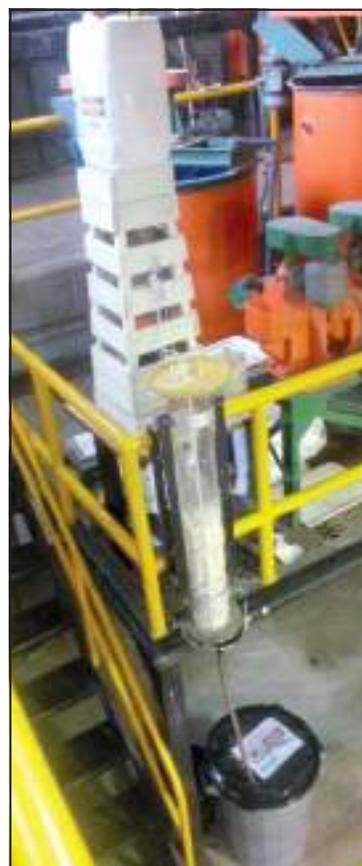


Figura 2. Montaje experimental en laboratorio experimental
Fuente: Autor

La concentración del ácido goteada a cada pila se muestra en la Tabla II, durante un tiempo aproximado de 49 días, a presión atmosférica y temperatura ambiente. La toma de muestra se hizo directamente sobre los tanques de almacenamiento. El volumen por muestra fue de 5 ml, que posteriormente fueron filtradas en papel filtro cualitativo de 125 mm de diámetro, para seguidamente realizar la medición de hierro total, en el espectrofotómetro de absorción atómica.

Tabla II. Concentración de ácido oxálico goteada a cada pila.

Pila	Concentración de ácido oxálico [M]
1	0.15
2	0.015
3	0.95

Fuente: Autor

2.4 Aglomeración

La aglomeración como pretratamiento sobre el mineral mejora la circulación de la solución a través de la pila (permeabilidad), además evita la segregación de partículas finas entre espacios vacíos dejados por partículas más gruesas, evitando zonas muertas y mejorando la percolación uniforme de la solución a través de la pila [11].

La permeabilidad se ve mejorada gracias a la presencia de partículas de alta densidad como el cuarzo que se depositan en la parte más exterior de los glómeros y las de baja densidad como lo son las arcillas que se depositan en la parte más interior de los glómeros [12]. (Ver Figura 3)

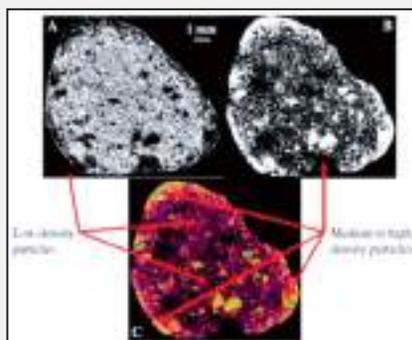


Figura 3. Configuración de estructuras cristalinas como lo son el cuarzo y la arcilla en la configuración de los glómeros
Fuente: [12]

2.5 Caracterización de soluciones de descarga

Las muestras para su análisis fueron colectadas en diferentes intervalos de tiempo,

directamente sobre el tanque almacenamiento. La concentración de hierro total fue determinada usando el espectrofotómetro de absorción atómica (Thermoscientific, Ice3000®) como se mencionó anteriormente

3. Resultados y análisis

3.1 Caracterización mineralógica

Los resultados de la Difracción de Rayos X (ver Figura 4) muestran en el mineral un 69% de Caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ y un 31% de cuarzo (SiO_2). En la muestra no se reportan los contaminantes del caolín que generan el cambio de la coloración como lo es la Hematita y la goethita, esto se debe a la baja concentración que tienen en el caolín, por eso se realizó una espectrofotometría de absorción atómica, determinando un porcentaje inicial de hierro de 0.19% en peso.

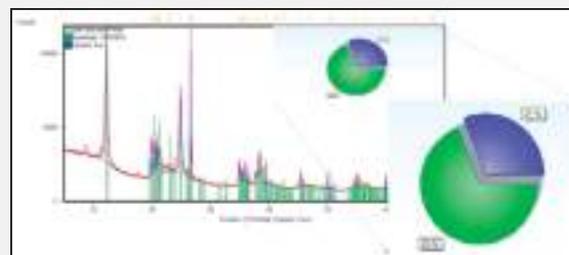


Figura 4. DRX de Caolín antes de blanqueo.
Fuente: Autor a partir de ensayo DRX.

En la tabla III se muestran la fórmula química de cuarzo y caolinita presentes en la muestra de acuerdo con el resultado del ensayo de difracción de Rayos X mencionado anteriormente.

Tabla III. Fases cristalinas del Caolín estudiado.

Ref Code	Compound Name	Chemical Formula
01-086-1560	Silicon Oxide	SiO_2
01-083-0971	Aluminium Silicate Hydroxide	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$

Fuente: A partir de ensayo DRX.

3.2 Blanqueo de Caolín

3.2.1 Lixiviación de Hierro

La lixiviación de hierro se efectuó en tres pilas, sus principales parámetros se muestran a

continuación en la Tabla IV. Por nomenclatura en el presente trabajo se van a denominar P1 para la Pila 1, P2 para la Pila 2 y P3 para la Pila 3.

Tabla IV. Variables de operación de las pilas de lixiviación.

PILA 1		
Variables	Unidades	Valor
Altura	Centímetros	30
Concentración de ácido Oxálico	Molaridad	0.15
Peso de mineral	Gramos	3325
Tiempo de lixiviación	Días	48.50
Hierro Alimento	%	0.19

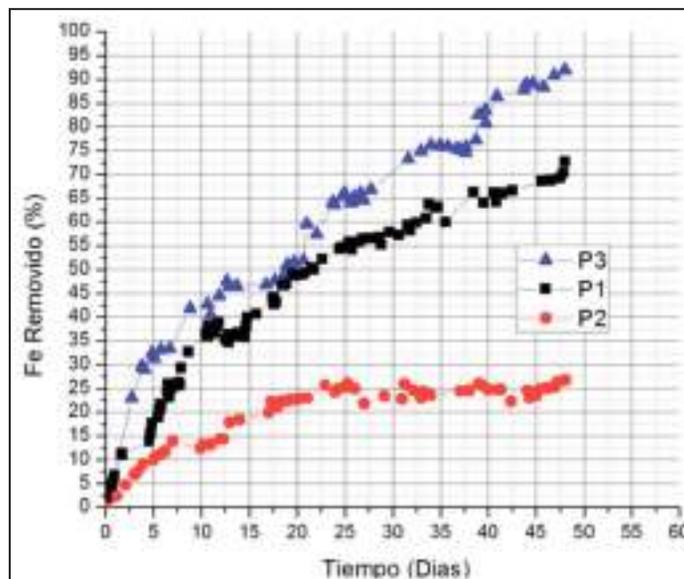
PILA 2		
Variables	Unidades	Valor
Altura	Centímetros	30
Concentración de ácido Oxálico	Molaridad	0.015
Peso de mineral	Gramos	3359
Tiempo de lixiviación	Días	48
Hierro Alimento	%	0.19

PILA 3		
Variables	Unidades	Valor
Altura	Centímetros	30
Concentración de ácido Oxálico	Molaridad	0.95
Peso de mineral	Gramos	3265
Tiempo de lixiviación	Días	48
Hierro Alimento	%	0.19

Fuente: Autor

La Gráfica 1 presenta los resultados de la cinética de la lixiviación de hierro en P1, P2 Y P3 con las diferentes concentraciones de

ácidos (0.15M, 0.015M Y 0.95M) en los 49 días de lixiviación.



Gráfica 1. Cinética de extracción de Fe.

Fuente: Autor

Observando la Gráfica 1, puede decirse que a medida que aumenta la concentración de ácido oxálico en solución aumenta la remoción de hierro, siendo para P1 Y P3 muy similar hasta los 20 días y para P2 muy notable su baja recuperación por su baja concentración.

Para P1 la recuperación máxima alcanzada fue del 72.2%, para P2 del 26.7% y para P3 del 90.8%. A medida que el tiempo transcurre, se nota una tendencia exponencial de las 3 pilas, lo que indica que en algún momento la remoción de hierro alcanza el equilibrio, por tal motivo se hace importante modelar y ver en qué momento la derivada de la remoción de hierro con respecto al tiempo se hace cero, para predecir la cantidad máxima de

porcentaje de hierro que se va a remover y el tiempo.

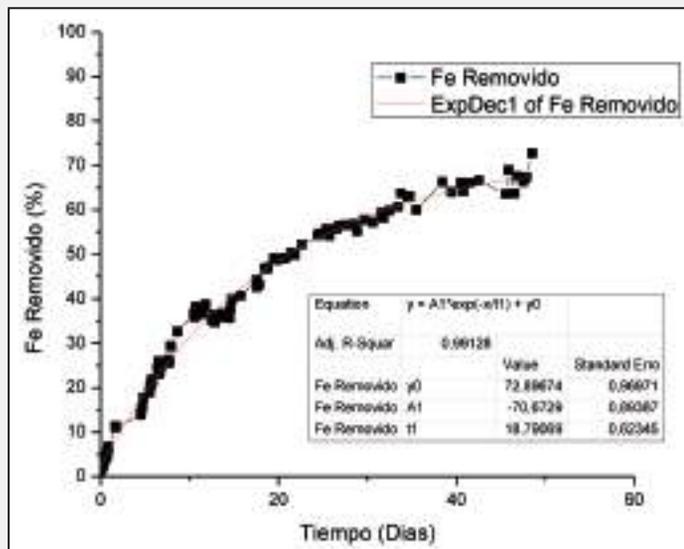
3.2.2 Modelación de la lixiviación de Hierro

Para cada una de las pilas de caolín se modelo sus comportamientos de remoción de hierro con respecto al tiempo, por esta razón se usó el software Origin®, para así determinar el modelo que mejor se ajuste de acuerdo a su R².

Modelación P1:

Se ajusta a un modelo exponencial con porcentaje de ajuste de 0.99128 en (6) y Gráfica 2:

$$\text{Fe Removido (\%)} = 70,6729e^{\left(-\frac{\text{Dias}}{18,7906}\right)} + 72,8967 \quad (6)$$



Gráfica 2. Simulación de cinética en Pila P1.

Fuente: Autor

A partir de la derivada de la curva cinética, se puede proponer que la remoción máxima en el equilibrio será del 72.55%, en un tiempo de 100 días:

Obteniendo como resultado para P1 en la modelación lo siguiente (ver Tabla V):

Tabla V. Resultados de la simulación para P1.

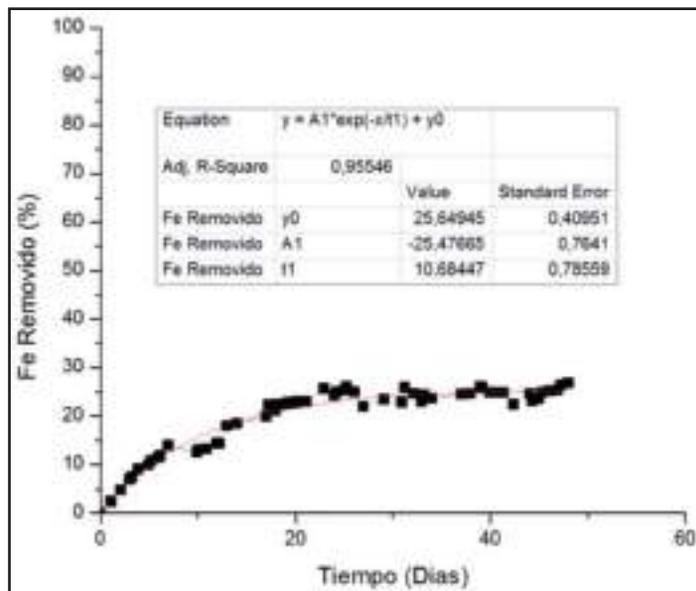
Fe removido (%)	Tiempo (Días)	Derivada
73	100	0,018

Fuente: elaboración propia

Modelación P2:

Se ajusta a un modelo exponencial con porcentaje de ajuste 0.95546 en (7) y Gráfica 3:

$$\text{Fe Removido (\%)} = 25,4766e^{\left(-\frac{\text{Dias}}{10,6844}\right)} + 25,6494 \quad (7)$$



Grafica 3. Simulación de cinética de extracción en P2.
Fuente: Autor

Obteniendo como resultado para Pila 2 en la modelación lo siguiente (ver Tabla VI)

Tabla VI. Resultados de la simulación para P2.

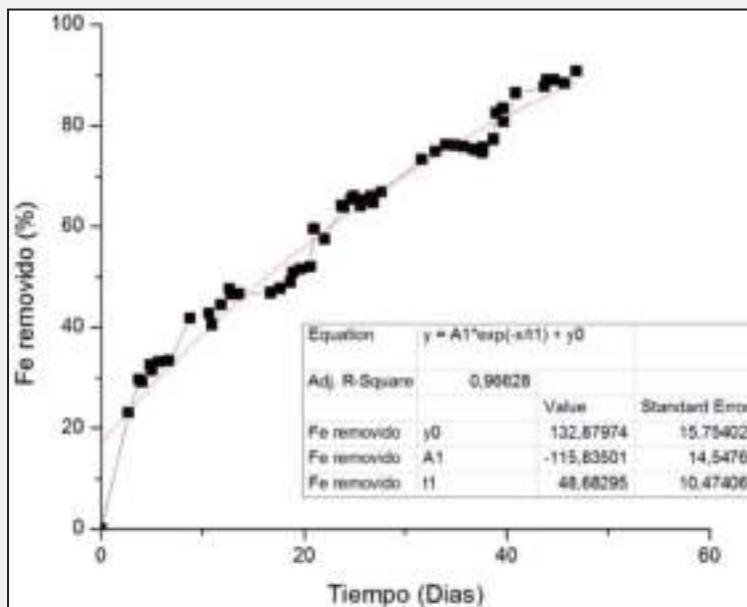
Fe removido (%)	Tiempo (Días)	Derivada
26	65	0,005

Fuente: Autor

Modelación P3:

Se ajusta a un modelo exponencial con porcentaje de ajuste de 0.96628 en (8) y Gráfica 4:

$$\text{Fe Removido (\%)} = 115.8e^{\left(-\frac{\text{Dias}}{48,6}\right)} + 132.8 \quad (8)$$



Grafica 4. Simulación de cinética en pila P3.
Fuente: Autor

Obteniendo como resultado para Pila P3 en la modelación lo siguiente (ver Tabla VII)

Tabla VII. Resultados de la simulación para P3.

Fe removido (%)	Tiempo (Días)
99	62

Fuente: Autor

En general, los porcentajes máximos de hierro removidos a tiempos diferentes para P1, P2 y P3 se muestran a continuación en modo de resumen para ver la relación entre

ellas, haciendo énfasis que para P3 se tiene la mayor remoción de hierro en menores días, que P1 y P2 (ver Tabla VIII).

Tabla VIII. Resultados de la simulación para P1, P2 y P3

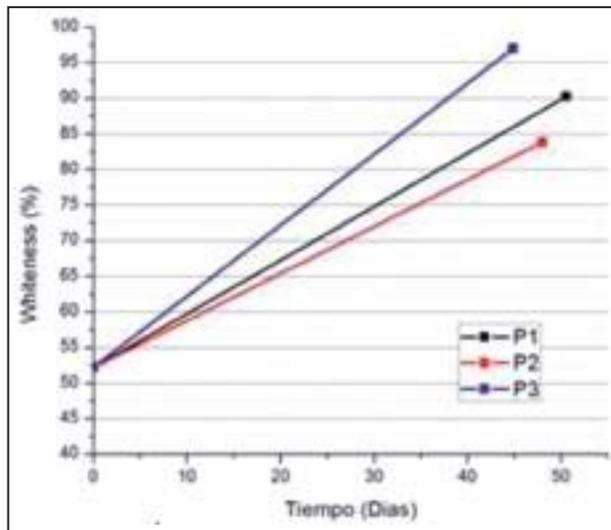
	Fe removido (%)	Tiempo (Días)
P1	73	100
P2	26	65
P3	100	63

Fuente: Autor

3.2.3 Colorimetría

Se midieron los índices de blancura del mineral antes y después de proceso de lixiviación. Se realizaron tres ensayos de índice de blancura por pila, al material de entrada y salida, a una granulometría de mineral pasante malla 325 (45 micras), debido a que a tamaños inferiores de 45 micras, el caolín tiene sus aplicaciones a nivel industrial.

En la Gráfica 5 y Tabla IX se muestran los índices de blancura alcanzados en las diferentes pilas a diferentes tiempos y donde se evidencia que la pila P3 alcanzó el mayor índice de blancura, debido a la mayor concentración en solución de ácido oxálico.



Grafica 5. Índices de blancuras Vs Tiempo, para P1, P2 y P3.
Fuente: Autor

Tabla IX. Ensayos de Índice de blancura para el material de alimento, y el producto final de P1, P2 y P3.

Color Alimento	Lab*	a*	b*	% W
-	Lab*	a*	b*	% W
Ensayo 1	102.80	-6.17	10.11	53.97
Ensayo 2	103.99	-8.23	8.96	52.43
Ensayo 3	104.22	-8.89	9.13	50.14
			Blancura definitiva	52.18
Color				
P1	Lab*	a*	b*	% W
Ensayo 1	102.31	-5.46	-1.41	90.16
Ensayo 2	101.61	-3.68	-0.774	92.90
Ensayo 3	100.51	-2.17	2.13	87.63
			Blancura definitiva	90.23
Color				
P2	Lab*	a*	b*	% W
Ensayo 1	103.32	-4.67	2.04	83.19
Ensayo 2	102.35	-3.12	1.92	87.23
Ensayo 3	104.69	-6.87	1.01	81.06
			Blancura definitiva	83.82
Color				
P3	Lab*	a*	b*	% W
Ensayo 1	107.55	-10.30	-5.91	94.37
Ensayo 2	109.46	-13.22	-9.98	99.73
Ensayo 3	109.22	-13.13	-9.02	96.90
			Blancura definitiva	97.00

Fuente: Autor

4. Discusión de resultados

De acuerdo con la distribución de tamaño de partículas, el 50% del mineral posee un tamaño inferior a 47.02 micrones, algo que evidencia la alta presencia de finos en las pilas, un factor que reduce severamente la

permeabilidad de la pila, pero que a través del proceso de aglomeración fue mitigado. En cuanto espectrofotometría de absorción atómica, se muestra un porcentaje inicial de hierro del 0.19% en peso del caolín, suficiente para darle coloración roja amarillosa.

A partir de los resultados experimentales, muestra que a una concentración de ácido oxálico de 0.95 M, se llegó a una remoción de hierro del 90.8% y un índice de blancura del 97%, seguido por una concentración de ácido oxálico de 0.15M, donde la remoción de hierro fue de 72.2% y un índice de blancura de 90.23% y a una concentración de ácido oxálico de 0.015M, una remoción de hierro de 26.7% y un índice de blancura de 83.82%. Estos resultados expresan la estrecha relación entre la concentración del ácido oxálico y el porcentaje de remoción de hierro de la muestra.

Las modelaciones expresan la máxima remoción posible por cada pila, dando como resultado que a las diferentes concentraciones 0.15M, 0.015M y 0.95 M, las máximas remociones fueron del 73%, 27% y 99% en un tiempo de 100, 65 y 200 días, respectivamente.

5. Conclusiones

A mayor concentración de ácido oxálico de goteo, mayor es la remoción de hierro sobre la superficie de caolín, evidenciada por remociones de 72.2%, 26.7% y 90.8%, para concentraciones de ácido 0.15M, 0.015M Y 0.95M, respectivamente. Es posible hacer lixiviación en pilas con ácido oxálico para el blanqueo de caolín, a pesar de que tiene un contenido muy alto de arcillas, se evidencia que una correcta aglomeración del material evita problemas de conductividad de la solución de ácido oxálico sobre el mineral. La concentración de la solución es una limitante económica, en la Tabla 9 se observa que P3 sólo se necesitaba 63 días para remover el 100% del hierro soluble, a diferencia de P1 que es de 100 días siendo casi 10 veces mayor la concentración de P3 que la de P1. La presencia de cuarzo y de macro caolines no altera el proceso, dado que no se encontró interferencias con la reacción de reducción del hierro y contrariamente le proporciona estabilidad al glómero, teniendo partículas más gruesas que la de la caolinita. El índice de blancura está directamente relacionado,

con el porcentaje de hierro removido sobre la superficie, algo reflejado por los índices de blancuras alcanzados de 90.23%, 83.82%, y 97%, para remociones de hierro de 72.2%, 26.7% y 90.8%, respectivamente en tan sólo 48 días de lixiviación en pila, lo cual es un tiempo corto si compara con la lixiviación de otros minerales como cobre u oro. La velocidad de remoción de hierro es proporcional a la concentración de ácido oxálico goteado. Ya que más iones están dispuestos a reaccionar con la superficie de la Hematita presentes en el caolín. Por lo cual es muy factible y de bajo costo la implementación de este nuevo método de blanqueo de caolín a nivel industrial, por la facilidad del método. Llegando a manejar concentraciones de ácido de 0.15M en periodos de 50 días.

6. Agradecimientos

La investigación expuesta fue realizada en el Instituto de Minerales CIMEX, en patrocinio con COLCIENCIAS, por tal motivo se agradece al instituto por su total colaboración y al proyecto jóvenes investigadores Universidad Nacional de Colombia-COLCIENCIAS 2014.

7. Referencias

- [1] H. Cornelius, *Manual de mineralogía de DANA*, Reverte, S. Barcelona, 1978.
- [2] Y. Hu and X. Liu, "Chemical composition and surface property of kaolins," *Miner. Eng.*, no. 11, pp. 1279–1284, Nov. 2003.
- [3] K. Ferguson, "Kaolin utilization in paper and paperboard grows beyond traditional U.S., U.K. Deposits", *Pulp & Paper*, vol 77, no. 9, pp. 34, 2003.
- [4] A. Cabrera La Rosa, "Minerales no metálicos I. Caolín," *Ministerio de fomento y obras públicas, Instituto Nacional de Investigación y Fomento Minero*. Lima, Peru, 1965.

- [5] V. . Ambikadevi y M. Lalithambika, “Effect of organic acids on ferric iron removal from iron-stained kaolinite”, *Applied Clay Science*, vol. 16, no. 3–4, pp. 133–145, Mar. 2000.
- [6] A. M. Gómez Jiménez y M. O. Bustamante Rúa, “Estudio del efecto de la fracción de ultrafinos, sobre blanqueo de caolines”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2012.
- [7] A. M. Muñoz García and M. O. Bustamante Rúa, “Blanqueo de caolines de la union Antioquia usando metodos hidro-electrometalúrgicos”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2010.
- [8] D. Panias, M. Taxiarchou, I. Douni, I. Paspaliaris, y A. Kontopoulos, “Mechanisms of dissolution of iron oxides in aqueous oxalic acid solutions”, *Hydrometallurgy* ,vol. 42, no. 2, pp.257–265, 1996.
- [9] J. P. Pinzón Forero, “Balance de masa en la planta de blanqueo de Caolín - SUMICOL”. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2010.
- [10] M. L. Free. *Hidrometallurgy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [11] N. Dhawan, M. S. Safarzadeh, J. D. Miller, M. S. Moats, y R. K. Rajamani, “Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations” *Minerals Engineering*, no. 41, pp. 53–70, Feb. 2013.
- [12] A. Nosrati, W. Skinner, D. J. Robinson, y J. Addai-Mensah, “Microstructure analysis of Ni laterite agglomerates for enhanced heap leaching”, *Powder Technology*, vol. 232, pp. 106–112, Dec. 2012.