

RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA

RESUMEN

Se estudió la recuperación mediante ácido sulfúrico, de sulfato de aluminio a partir de lodos recolectados durante las diferentes rutinas de operación y mantenimiento de los sedimentadores en plantas de potabilización. Se efectuaron ensayos de jarras a pHs 1,5, 2,5 y 3,5 y tiempos de mezcla lenta de 5, 30 y 100 minutos. Se alcanzaron porcentajes de recuperación de aluminio entre 18 y 64% y soluciones con concentraciones entre 8,9 y 1510 mg Al/l. Finalmente, se evaluó la factibilidad económica de la reutilización en el proceso de potabilización, de la solución de coagulante recuperado.

PALABRAS CLAVES: Sulfato de aluminio, lodos de potabilización, recuperación ácida, factibilidad económica.

ABSTRACT

This research studied alum recovery, using sulphuric acid, from sludge collected during settlers operation and maintenance routines in water potabilization systems. Jar tests were carried out at pHs of 1.5, 2.5, 3.5 and slow mixing times of 5, 30 and 100 minutes. Alum recovery percentages from 18 to 64% were reached, generating solutions with Aluminium concentrations ranging from 8.9 to 1510 mg/l. Finally, the economical feasibility of reusing recovered alum solutions in the potabilization process was evaluated.

KEYWORDS: Alum, water potabilization sludges, acid recovery, economical feasibility. .

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia no se tiene una estadística confiable sobre la cantidad de lodos producidos en los sistemas de potabilización existentes y su destino final. En el mejor de los casos algunas empresas de acueducto disponen el lodo producido en rellenos sanitarios (que generalmente no tienen una infraestructura adecuada para su manejo), sin embargo, en su mayoría, los lodos son dispuestos directamente en los cuerpos de agua al momento de hacer limpieza y mantenimiento de las unidades de tratamiento [3]. Según el Ministerio de Desarrollo Económico [9], la mayoría de los municipios poseen sistemas de potabilización, particularmente plantas compactas y convencionales, basadas en la adición de un coagulante, predominantemente sulfato de aluminio. El uso de coagulantes en el tratamiento de agua para consumo humano implica la producción de lodos como subproducto. Es de esperarse que el volumen de los lodos producidos oscile entre el 0.3 y el 1% del agua tratada [11]. El manejo y la disposición de dichos lodos es un problema importante que en Colombia y en Latinoamérica no ha sido resuelto, reportándose pocas experiencias sobre alternativas económicamente viables para países en vías de desarrollo [3, 11]. La composición de los lodos generados en un sistema de abasto depende de la calidad del agua cruda así como de los procesos

empleados para la potabilización. El lodo producido durante la coagulación contiene óxidos e hidróxidos

metálicos y contaminantes orgánicos e inorgánicos como arcilla, arena y microorganismos, entre otros elementos. Igualmente, se caracteriza por su alto contenido de agua (baja concentración de sólidos), alta resistencia a la deshidratación mecánica, y en general gran dificultad para su manejo y tratamiento [2,3, 8, 11]. Para lodos aluminosos (aquellos generados como subproducto de coagulación con sales de aluminio), Chu [4] afirma que poseen cerca de 39 % de aluminio en peso, presumiblemente en forma de $Al(OH)_3$. SenGupta y Prakash [12] afirman que el hidróxido de aluminio insoluble representa de un 25% a un 60% de los sólidos del lodo. Una alternativa de manejo puede ser la recuperación del coagulante por medio de la solubilización del aluminio presente en el lodo. Debido al carácter anfótero del $Al(OH)_3$, este proceso es viable mediante acidificación o alcalinización [4, 12]. Para efectos del presente estudio, se estudió la recuperación de coagulante vía ácida, mediante la adición de ácido sulfúrico concentrado a fin de obtener una solución rica en Al^{+3} . La siguiente ecuación [12] ilustra la estequiometría de la reacción para un proceso de tratamiento basado en la adición de sulfato de aluminio (alumbre):

JUAN DAVID VILLEGAS G.

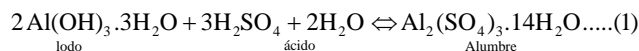
Ingeniero Químico
Profesor Catedrático e investigador
Grupo de Investigación en Agua y
Saneamiento
Universidad Tecnológica de Pereira
jvillega@ambiental.utp.edu.co

JUAN MAURICIO CASTAÑO R.

Ingeniero Químico, MSc.
Director del Instituto de
Investigaciones de la Facultad de
Ciencias Ambientales.
Universidad Tecnológica de Pereira
jmc@ambiental.utp.edu.co

DIEGO PAREDES CUERVO

Ingeniero Sanitario, MSc,
Candidato a Doctorado
Coordinador del Grupo de
Investigación en Agua y
Saneamiento
Universidad Tecnológica de Pereira
diego.paredes@ufz.de



Chu [4] reporta porcentajes de recuperación vía ácida entre 70% y 90%, a pHs entre 1 y 3, en procesos que incluyen separación con carbón, filtración, concentración y cristalización del coagulante recuperado. El mismo autor, aunque menciona experiencias que resultaron económicamente viables, subraya la complejidad del proceso, y señala la posible interferencia en la calidad del coagulante recuperado, debida a sustancias orgánicas contenidas en los lodos. Franci et al [6] establece en un estudio realizado en Brasil, que para poblaciones entre 20000 y 50000 habitantes, es viable económicamente recuperar y clarificar el sulfato de aluminio, a partir de lodos provenientes de plantas potabilizadoras de agua, y utilizarlos posteriormente en las propias plantas o en sistemas de tratamiento de aguas residuales. El presente artículo resume los resultados de la evaluación, a escala laboratorio, del proceso de la solubilización con ácido sulfúrico del aluminio presente en lodos de potabilización. Igualmente, se evaluó la viabilidad económica de implementar el proceso en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira (Aguas & Aguas de Pereira)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Lodos aluminosos. Para esta investigación se usaron lodos provenientes de la planta Písamo I, una de las cuatro plantas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira (Aguas y Aguas de Pereira). Estos lodos fueron recolectados durante las diferentes rutinas de operación y mantenimiento de las unidades de sedimentación, es decir, durante la *purga* diaria realizada a las unidades (vaciado corto para evitar acumulación de sólidos), durante el *vaciado*, o descarga completa de la unidad, llevada a cabo mensualmente, así como durante el *lavado* o remoción por medio de agua a presión de los sólidos no evacuados en el proceso anterior. En todos los casos se tomaron muestras compuestas integradas en el tiempo. La toma de muestras se planificó en época lluviosa, ya que en época de estío la dosificación de coagulantes es mínima debido a las bajas concentraciones de sólidos que presenta el agua que ingresa a la planta. Se tomaron en total 5 muestras de lavado, 5 de vaciado y 6 de purga.

2.2 Montaje experimental. Las muestras de lodos fueron conducidas a los Laboratorios de Microbiología y Procesos Biológicos de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, donde se caracterizaron de acuerdo con los siguientes parámetros: DQO, DBO₅, SST, SSV; ST; STV, % de humedad, Fósforo total, Nitrógeno NTK, pH, coliformes totales, coliformes fecales, aluminio, hierro, magnesio, calcio. Todos los análisis se efectuaron según los Métodos Estándar [1]. A fin de evaluar la recuperación

de alumbre a partir de estos lodos, se efectuaron ensayos de jarras, adaptando la metodología seguida por Rosero [10]. Se evaluaron 3 tratamientos diferentes y un control del experimento, agregando 2000 ml de lodo a cada jarra, con agitación durante 15 minutos a 100 r.p.m a fin de homogenizar la muestra (Figura 1). Para cada ensayo, a tres de las cuatro jarras se dosificó lentamente ácido sulfúrico concentrado hasta alcanzar pHs de 1,5, 2,5 y 3,5 unidades respectivamente. Se continuó agitando y se tomaron muestras de 100 ml de lodo acidificado a los 5, 30 y 100 minutos. Para garantizar una adecuada separación de fases, se dejó decantar la muestra durante 24 horas. Finalmente, se filtró el sobrenadante y tanto en este como en los lodos remanentes se determinan las concentraciones de aluminio por medio de un Espectrofotómetro de absorción atómica Thermo elemental 969 SOLAAR con horno de grafito. La concentración de aluminio (g Al/Kg lodo seco) encontrada en los lodos de la jarra en blanco, sirvió para determinar el porcentaje de recuperación en cada uno de los tratamientos.

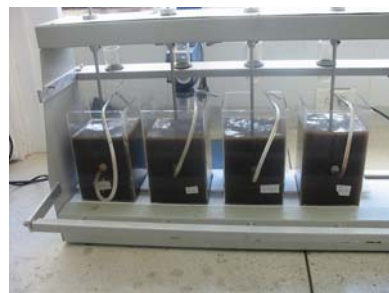


Figura 1 Ensayo de Jarras para evaluar la recuperación de aluminio en lodos de potabilización.

2.3 Diseño experimental. Se empleó un diseño factorial de bloques completamente al azar (Tabla 1). Los factores evaluados fueron el pH del proceso (1,5, 2,5, 3,5) y el tiempo de mezcla (5 min, 30 min, 100 min), usando como covariable el origen del lodo, es decir, la rutina de operación y mantenimiento a partir de la cual fueron recolectados los lodos.

Factores	Tratamientos
pH	1,5
	2,5
	3,5
Tiempo de mezcla (TM)	5 min
	30 min
	100 min
Operación y mantenimiento (O&M) Covariable	Purga
	Lavado
	Vaciado

Tabla 1 Diseño experimental

2.3 Análisis costo-beneficio. Se evaluó la viabilidad de la recuperación de coagulante a partir de lodos y su reincorporación al proceso de potabilización para las condiciones de planta de la empresa Aguas y Aguas de

Pereira, teniendo en cuenta los costos de reactivos y el cobro, por parte de la autoridad ambiental, de tasas retributivas por el vertimiento de los lodos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los lodos. La Tabla 2 resume las características de los lodos usados para el estudio. Estos presentan condiciones comparables a las reportadas por la literatura [4,5, 8, 11] en cuanto a altas concentraciones de sólidos totales y de Al^{+3} , superiores en todo caso para los lodos de vaciado.

	Media ± LC			
	Lavado	vaciado	Purga	Total
DQO (mg/l)	3014	3783	486	2306 ± 1611
DBO ₅ (mg/l)	338	561	79	310 ± 173
ST (mg/l)	12020	16785	2297	9747 ± 9783
SST (mg/l)	8467	15605	1903	7693 ± 7641
Humedad %	99,2	98,6	99,8	99,2 ± 0,7
Fósforo (mg/l)	8,8	14,0	1,9	7,4 ± 4,8
NTK (mg/l)	77	87	11	53 ± 26
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,5*10 ⁵	7,9*10 ⁴	2,1*10 ⁵	1,6*10 ⁵
Coliformes fecales (NMP/100ml)	2,2*10 ⁴	5,2*10 ⁴	1,2*10 ⁴	2,6*10 ⁴
Aluminio (mg/l)	183	205	68	152 ± 128
Hierro (mg/l)	105	179	45	115 ± 61
Magnesio (mg/l)	16	24	5	16 ± 8
Calcio (mg/l)	37	74	18	45 ± 29
pH	6,5	6,4	6,5	6,5 ± 0,2

Tabla 2 Características físico-químicas de los lodos de sedimentadores en la Planta Písamo I de Aguas y Aguas de Pereira.

3.2 Recuperación de aluminio. Los mayores porcentajes de recuperación se dieron proporcionalmente a la cantidad de ácido sulfúrico añadida, y en menor medida al tiempo de mezcla (Figura 2). Es así como para pHs de operación entre 1,5 y 2,5 se obtienen los mayores porcentajes de recuperación. El tiempo de mezcla de 100 minutos permitió alcanzar porcentajes de recuperación ligeramente superiores. La misma tendencia se puede observar (Figura 3, Tabla 3) sin importar la procedencia del lodo (purga, vaciado y lavado). Sin embargo, cabe anotar que la recuperación para lodos de purga fue en promedio de 30, 8% ± 6,9 teniendo en cuenta que el promedio global para todos los tratamientos fue del 44,1% ± 4,2. Las mayores recuperaciones se obtuvieron acidificando lodos de lavado y vaciado (49,9% ± 7,5 y 48,4% ± 6,5 respectivamente). Tomando como variable de respuesta la concentración de aluminio en el sobrenadante, a tener en cuenta si se piensa en la

reutilización del producto en el proceso de potabilización, se aprecian similares resultados (Figura 4).

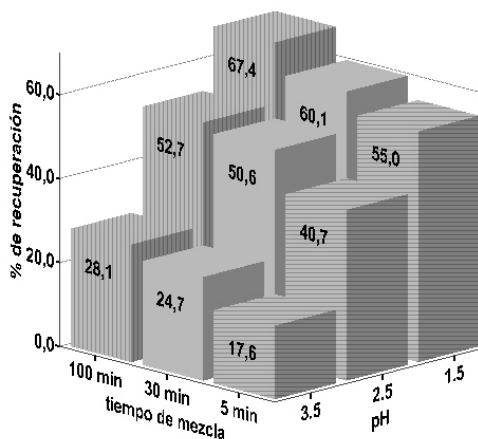


Figura 2 Porcentajes de recuperación de aluminio.

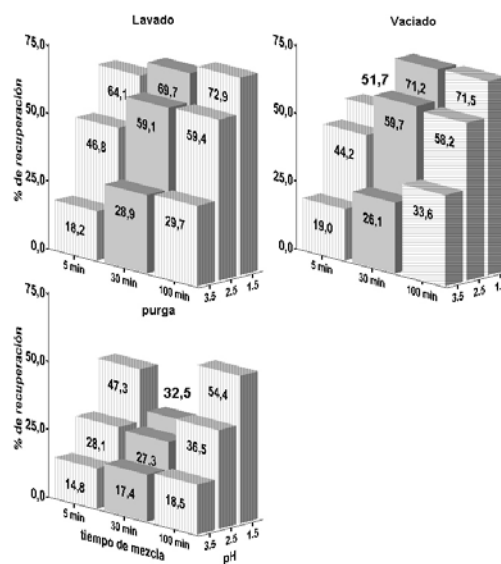


Figura 3 Porcentajes de recuperación de acuerdo con la procedencia del lodo.

	Recuperación de Aluminio											
	% de recuperación				Error estándar de la media				N			
	fuente de lodo				fuente de lodo				fuente de lodo			
	lavado	vaciado	purga	Total	lavado	vaciado	purga	Total	lavado	vaciado	purga	Total
1.5-5min	64,1	51,7	47,3	55	2,6	5,8	15,7	4,8	4	4	3	11
2.5-5min	46,8	44,2	28,1	41	6,1	5,5	3,4	3,8	4	4	3	11
3.5-5min	18,2	19,0	14,8	18	3,9	3,0	3,1	1,9	4	4	3	11
1.5-30min	69,7	71,2	32,5	60	6,5	1,5	8,3	6,1	4	4	3	11
2.5-30min	59,1	59,7	27,3	51	10,8	1,0	7,2	6,0	4	4	3	11
3.5-30min	28,9	26,1	17,4	25	3,7	1,4	1,7	2,0	4	4	3	11
1.5-100min	72,9	71,5	54,4	67	4,6	2,5	13,3	4,4	4	4	3	11
2.5-100min	59,4	58,2	36,5	53	8,6	1,6	2,4	4,3	4	4	3	11
3.5-100min	29,7	33,6	18,5	28	6,2	3,2	,9	3,0	4	4	3	11
Total	49,9	48,4	30,8	44	3,7	3,2	3,3	2,1	36	36	27	99

Tabla 3 Porcentajes de recuperación de aluminio.

que el único factor demostró influencia significativa fue el pH de operación ($p < 0,05$).

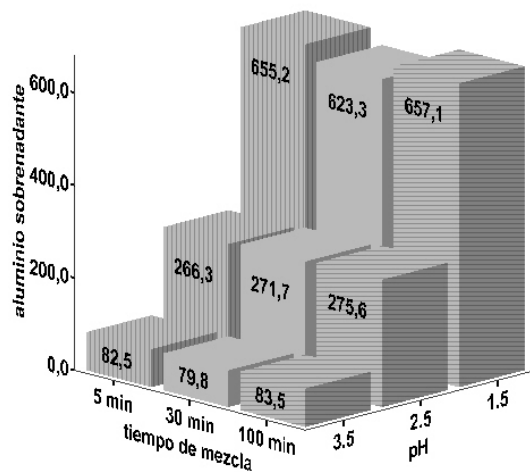


Figura 4 Concentración de aluminio en el sobrenadante.

Pudo observarse que las soluciones obtenidas a partir de lodos de purga presentaron una concentración notoriamente menor que las obtenidas a partir de lodos de vaciado y de lavado (Tabla 4, Figura 5). Las soluciones más concentradas se obtuvieron a partir de lodos de vaciado manteniendo el pH en 1,5 y mezclando durante 5 minutos (1510,1 mg/l \pm 2398). Las de menor concentración, a partir de lodo de purga a pH de 3,5 mezclando entre 5 y 30 minutos (8,9 mg/l \pm 31,4). En todos los casos se puede notar una gran variabilidad en los resultados obtenidos. Sandoval et al [11] reportan concentraciones entre 480 y 1340 mg/l de aluminio recuperado en solución. La Tabla 5 resume los resultados del análisis de varianza de acuerdo con el diseño experimental planteado, usando como variable de respuesta el porcentaje de recuperación de aluminio. Tanto el factor pH, como el factor tiempo de mezcla (TM) y la covariable fuente de lodo según rutina de operación y mantenimiento (O & M), resultaron tener influencia significativa en la recuperación de aluminio ($p < 0,05$). Contrariamente, la interacción entre factores no resultó significativa ($p > 0,05$). En ese sentido, la Figura 6 muestra que en todo caso a mayor adición de ácido y a mayores tiempos de mezcla lenta, mayor porcentaje de resuspensión del aluminio. Sin embargo, se pudo apreciar que a pHs más bajos, la recuperación con tiempo de mezcla entre 30 y 100 minutos fueron similares entre sí y superiores a las alcanzadas con tiempos de 5 minutos (Figura 6). Esto podría indicar que dependiendo de la dosis de ácido sulfúrico, el factor tiempo de mezcla puede resultar crítico en cuanto a la eficiencia del proceso. La potencia observada para la interacción entre factores ($p < 0,8$), denota la necesidad de mayor evidencia experimental al respecto. A partir del mismo diseño experimental, pero usando como variable de respuesta la concentración de aluminio en el sobrenadante, se tiene

Aluminio en el sobrenadante (mg/l)

tratamiento	aluminio sobrenadante											
	Media			Error estándar de la media			N					
	fuente de lodo			fuente de lodo			fuente de lodo					
	lavado	vaciado	purga	Total	lavado	vaciado	purga	Total	lavado	vaciado	purga	Total
1.5-5min	265	1510,1	35,4	655	80,0	754,2	27,8	325	4	4	3	11
2.5-5min	102	619,4	15,0	266	44,0	326,3	11,7	138	4	4	3	11
3.5-5min	85,6	134,6	8,9	82,5	51,0	92,5	7,3	38,3	4	4	3	11
1.5-30min	283	1407,4	30,8	623	81,8	658,3	23,4	290	4	4	3	11
2.5-30min	116	620,0	14,9	272	45,1	291,0	11,9	129	4	4	3	11
3.5-30min	78,4	134,3	8,9	79,8	45,1	87,7	7,6	36,2	4	4	3	11
1.5-100min	291	1493,1	31,1	657	83,7	735,1	23,4	317	4	4	3	11
2.5-100min	99,4	647,7	14,6	276	40,7	323,3	11,5	140	4	4	3	11
3.5-100min	82,2	140,7	9,0	83,5	47,2	89,3	7,6	37,3	4	4	3	11
Total	156	745,3	18,7	333	23,1	162,5	6,0	67,3	36	36	27	99

Tabla 4 Concentración de aluminio en el sobrenadante.

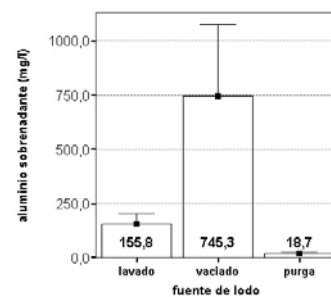


Figura 5 Concentraciones promedio de aluminio en el sobrenadante según fuente de lodo (las barras de error representa el intervalo de confianza al 95%).

Dependent Variable: % de recuperación

	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.	Potencia Observada
O & M	5183,299	1	5183,299	35,758	,000	1,000
pH	23809,916	2	11904,958	82,130	,000	1,000
TM	2286,436	2	1143,218	7,887	,001	,947
pH*TM	103,003	4	25,751	,178	,949	,086
Error	12900,823	89	144,953			
Total	236836,970	99				
Total corregido	44283,476	98				

^a Calculada usando un alpha = .05

Tabla 5 ANOVA del porcentaje de recuperación

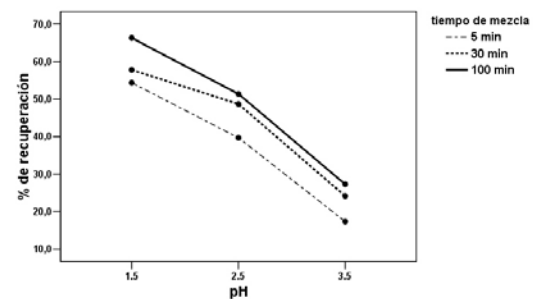


Figura 6 Medias marginales de Porcentaje de recuperación (interacción entre factores)

Se puede notar que en todo caso la concentración de aluminio en la solución sobrenadante depende predominantemente de la cantidad de ácido sulfúrico adicionado sin importar el tiempo de mezcla (Figura 7). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, a partir de lodo de vaciado se obtiene soluciones con mayor contenido de coagulante recuperado (Figura 5). La baja potencia ($p < 0,8$) reportada por el ANOVA con respecto al factor O & M, y asociada a una alta variabilidad en los resultados, sugiere la necesidad de un mayor número de repeticiones a fin de sacar conclusiones válidas estadísticamente.

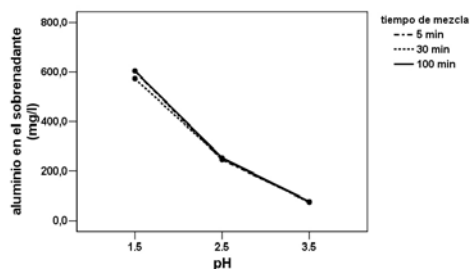


Figura 7 Medias marginales de concentración de aluminio en el sobrenadante.

A partir de los resultados obtenidos es dado concluir que la eficiencia del proceso de recuperación de aluminio depende de las concentraciones de hidróxido insoluble presentes en el lodo. Así mismo, el pH hasta el cual se acidifica, resulta esencial en dicha eficiencia, en especial en cuanto a la riqueza en coagulante de la solución recuperada. Esto era de esperarse, puesto que la adición de iones H^+ , causa el desplazamiento del equilibrio hidrolítico favoreciendo la formación de especies solubles de aluminio. Adicionalmente, especialmente a pHs bajos, la presencia de cationes como el sulfato puede incrementar, la solubilidad del aluminio [7]. El proceso de solubilización vía ácida de aluminio es un proceso no selectivo [12]. Por consiguiente, la solución sobrenadante que resulta podría contener altos niveles de materia orgánica natural (MON), esencialmente en forma de fulvatos y humatos, que en la eventualidad de un proceso de reutilización de dicha solución, podría generar, a partir de la etapa de cloración, compuestos nocivos como Trihalometanos (THMs). Igualmente, la solubilización de otros metales pesados además del aluminio, también sería posible. En este sentido, el rango de pH para el cual predominan las especies no solubles de aluminio se establece para valores muy cercanos a 6, contrariamente a lo que ocurre con metales como el Hierro (Fe), que presentan baja solubilidad a rangos de pH más amplios [7]. Dado lo anterior, podría sugerirse entonces como alternativa, la digestión alcalina del lodo, a fin de disminuir la solubilización de otros metales. En todo caso, esto no evitaría la liberación de la MON atrapada en el floc de $Al(OH)_3$ tras el proceso de coagulación [12]. Finalmente, aunque en forma más débil, el tiempo de mezcla influye en los porcentajes de recuperación del aluminio. Las constantes cinéticas de la hidrólisis de las

sales de aluminio, podrían dar cuenta de esta incidencia, ya que, siguiendo a Gregory & Duan [7], permiten que el equilibrio de las especies solubles con el precipitado sólido se alcance muy lentamente.

3.3 Análisis costo-beneficio. Este artículo presenta un análisis preliminar de la viabilidad económica de recuperar aluminio vía ácida a partir de lodos aluminosos generados en la empresa Aguas y Aguas de Pereira, y de usar el sobrenadante obtenido durante el proceso, en la preparación de la solución con la que se dosifica el sulfato de aluminio en planta. Los cálculos se hicieron para las plantas Písamo I y Písamo II de dicha empresa. El producto químico de mayor uso en la planta es el Sulfato de Aluminio granulado Tipo B. Su dosificación no es constante y depende de la turbiedad del afluente, que a su vez está asociada a las condiciones climáticas. En planta, la dosis suministrada se registra como la concentración de producto comercial bruto, sin tener en cuenta la pureza. La dosis que aparece en la Tabla 6 corresponde al promedio agregado durante el año 2004, al igual que el porcentaje de Alumbre en el producto, su costo y el caudal de entrada a las plantas. Las condiciones propuestas para el proceso de recuperación fueron pH de 1,5 y tiempo de mezcla de 100 minutos. Las condiciones iniciales del lodo, los porcentajes de recuperación y demás datos del proceso incluidos en el análisis, corresponden a los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental. La reducción en los parámetros objeto de tasa retributiva según la legislación colombiana fue estimada de acuerdo con consideraciones estequiométricas y a la literatura [5,12]. El análisis sumariado en la Tabla 6, no incluye costos de capital ni costos energéticos. A pesar de ello, se hace evidente que los costos, influenciados grandemente por el del ácido sulfúrico, superan en gran medida a los beneficios derivados del ahorro en la dosificación del coagulante y del ahorro asociado a la reducción en el monto apagar por concepto de tasa retributiva¹, debido a la disminución del contenido de sólidos en los lodos vertidos al recurso hídrico. Es claro entonces que, escenarios de normatividad más restrictiva en cuanto al vertimiento de lodos, de reducción en costos de reactivos o de implementación de incentivos tributarios a la aplicación de tecnologías limpias en la potabilización del agua, redundarían en un incremento de la viabilidad económica del proceso. Por ejemplo, los costos de acidificación se verían drásticamente reducidos al reducir el volumen de lodo a tratar, lo que podría lograrse con un proceso de deshidratación preliminar al proceso (lechos de secado). En todo caso, ensayos en planta real se hacen necesarios para determinar con mayor certeza la sostenibilidad de este tipo de proyectos.

¹ Regulado por el decreto 3100 de 2003, con base en la Tarifa Mínima por Kilogramo de sustancia contaminante (establecida por la Resolución 273 de 1997 y cuyo incremento anual con base en el IPC del año inmediatamente anterior lo establece la Resolución 372 de 1998).

Costos					Beneficios	
Potabilización		Recuperación	Tasa Retributiva		Reincorporación	Acondicionamiento
Caudal 0,769 m ³ /s	SA a adicionar 0,024 Kg/s	Costo H ₂ SO ₄ \$13639/l	Tarifa regional \$35,7/Kg	Carga 160,5 Kg/d	Alumbre en el producto comercial 15,2%	Porcentaje de recuperación de Aluminio 67%
Costo SA \$383/Kg	Caudal solución dosificadora 0,0012 m ³ /s	Cantidad de H ₂ SO ₄ (pH 1,5) 20 ml/L lodo	Tarifa regional \$83,41/Kg	Carga 6,5 Kg/d	Alumbre recuperado en el sobrenadante 521 mg/l	% de reducción de SST 5%
Dosis de SA 31,5 mg/l	Dosificación anual 17,6 %	Caudal de vertimiento de lodos 20856 l/d	SST 7693 mg/l	Monto tasa retributiva \$2.256.186/año	Alumbre suministrado por solución dosificadora preparada con sobrenadante 0,0042 Kg/s	% de reducción de DBO ₅ 5%
Solución Dosificadora 2 %	Costo del SA a adicionar \$ 51.541.895/año	Costo recuperación \$ 2.076.495.535/año	DBO ₅ 310 mg/l		Ahorro por reincorporación al proceso \$ 21.043.825/año	Ahorro por tasa retributiva \$ 431.823/año
\$ 2.130.293.616/año					\$ 21.475.648	

Tabla 6 Análisis costo-beneficio¹ de la utilización del coagulante recuperado en el proceso de potabilización de Aguas y Aguas de Pereira.

4. CONCLUSIONES

El lodo proveniente del vaciado rutinario de los sedimentadores en la planta Písamo I de Aguas y Aguas de Pereira presentó mayores concentraciones de sólidos y de aluminio. Así mismo, a partir de este tipo de lodos, se obtuvieron soluciones con mayor concentración de Al⁺³ que a partir de lodos obtenidos en la purga y el vaciado de las mismas unidades. El análisis de varianza reportó diferencias significativas en porcentaje de recuperación en cuanto al pH de operación, tiempo de mezcla y características del lodo. En cuanto al contenido de aluminio en la solución sobrenadante, el tiempo de mezcla no produjo diferencias significativas, siendo el pH el factor controlante. Se alcanzaron recuperaciones cercanas al 70% con lodos de vaciado y de lavado acidificados hasta pH 1,5 y agitados durante 100 minutos. Se obtuvieron soluciones de concentraciones alrededor de 1500 mg/l a partir de lodos de vaciado a pH 1,5. Debido al costo del ácido sulfúrico, la reincorporación del coagulante recuperado no resulta económicamente viable bajo las condiciones evaluadas, haciéndose necesaria la reducción del volumen del lodo para reducir costos de acidificación. Se recomienda realizar ensayos en planta piloto y en planta real, a fin de validar los resultados.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se pudo realizar gracias a la financiación de COLCIENCIAS – SENA, a la

cofinanciación de la Universidad Tecnológica de Pereira y a las Empresas Aguas y Aguas de Pereira y Americana de Curtidos que han facilitado su infraestructura e instalaciones para el buen desarrollo de la misma. Igualmente se agradece a los estudiantes de Tecnología Química de la Universidad Tecnológica de Pereira que participaron en el proyecto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] APHA., AWWA., WEF (1996) Standard methods for Examination of water and Wastewater, 20^a edición, Washington D.C.
- [2] AZIZ, A., DE KRESTER, R., DIXON, D.R. SCALES, P. (2000) The Characterization of Slurry Dewatering. Water Science and technology. Vol 41 No 8, pp 9-16.
- [3] BERÓN, C.F (1997). Incidencia de los Pretratamientos en medios porosos en el tratamiento de agua químicamente coagulada. Tesis de Maestría. Universidad del Valle.
- [4] CHU, W. (1999) Lead Metal Removal by Recycled Alum Sludge. Water Research. Vol. 33, No 13, pp. 3019-3025.
- [5] CHU, W. (2001) Dye Removal from Textile Dye Wastewater Using Recycled Alum Sludge. Water Research. Vol.35, No 13, pp. 3147-3152.
- [6] FRANCI, R., TEIXEIRA, J., DA SILVA, E.M. (1999) Viabilidade Econômica da Regeneração do Sulfato de alumínio de Lodos de Estações de Tratamento de Águas. 20º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- [7] GREGORY, J., DUAN, J. (2001). Hydrolyzing metal salts as coagulants. Water Research. Vol. 35, No. 3: 795-807
- [8] KAGGWA, R.C., MULALELO, C.I., DENNY, P., OKURUT, T. (2001). The impact of alum discharges on a natural tropical wetland in Uganda. Water Research. Vol. 35, No. 3: 795-807
- [9] MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO Y SOCIAL (1996) Diagnostico del Sector Agua Potable y Saneamiento en Colombia.
- [10] ROSERO MOREANO, M. (1998) Recuperación de sulfato de Aluminio de Lodos generados durante el Proceso de Potabilización del Agua. Tesis, Universidad del Valle, Santiago de Cali. 1998.
- [11] SANDOVAL, L., FLORES L.M., MOTELLANO L., MORÁN, M.A., RUBÍ, R., SÁNCHEZ, L., SANTANA, M.I., VÁSQUEZ, S., MARTÍN, A. (1998) Tratabilidad de los Lodos Producidos en la Potabilización del Agua. Seminario Regional Bional sobre Potabilización Filtración. Septiembre de 1998. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- [12] SENGUPTA, A., PRAKHAR, P. (2004) Alum Recovery from Water Treatment Works sludges. Water 21. Magazine of the International Water Association. IWA pp 15-16.

¹ costos y beneficios calculados en moneda colombiana (pesos del 2004)