

Secado de lodos obtenidos en el proceso de purificación de agua

Daniel A. Glatstein¹

¹ *Departamento de Química Industrial y Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba; e Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, UNC-CONICET), Córdoba, Argentina.*

Fecha de recepción del manuscrito: 02/01/2017
Fecha de aceptación del manuscrito: 27/03/2017
Fecha de publicación: 15/09/2017

Resumen— Todo proceso industrial genera desechos que deben ser reutilizados, reciclados o al menos minimizados. Esto le otorga a la empresa una ganancia extra en la reutilización o reciclado y un menor costo de disposición en el caso de la minimización, como así también le permite posicionarse como una empresa “verde”, amigable con el ambiente. La potabilización de agua genera como principal residuo un lodo compuesto por los sólidos y microorganismos que el agua natural trae en suspensión, además de compuestos químicos agregados durante el proceso de potabilización como coagulantes y floculantes. En general, estos lodos no poseen por sí mismos las características geomecánicas de resistencia y rigidez para ser usados directamente en la construcción y ocasionan un impacto en el ambiente debido fundamentalmente al elevado volumen obtenido. El transporte y disposición de estos lodos acarrea un costo proporcional al volumen que debe ser minimizado y, considerando el elevado contenido de humedad (cercano al 600% en base de lodo seco), la mejor opción es el secado. En el presente trabajo se estudió a escala laboratorio el proceso de secado de los lodos provenientes del proceso de potabilización de agua de la planta Suquía de la empresa Aguas Cordobesas S.A. Se analizó la influencia de las temperaturas de secado y el área y el volumen de las muestras en el tiempo de secado, con el fin de obtener valores orientativos del proceso de deshidratación térmica de los lodos. Los resultados obtenidos demuestran que la eliminación de agua debido al secado reduce la masa del lodo en un 82%, constituyendo así un tratamiento de interés previo al transporte y disposición final de los mismos.

Palabras clave— Comportamiento térmico, contracción térmica, secado natural y forzado, desechos industriales.

Abstract— Every industrial process generates a waste that should be reused, recycled or, at least, reduced. This gives the company an extra profit when reusing or recycling and a lower cost on the disposal when minimizing, at the same time that allows it to position as a “green” company, environmentally friendly. Drinking water treatment generates as main residue a sludge composed of solids and microorganisms carried by natural water, as well as many other chemical compounds added in the purification process. This sludge does not have any constructive aptitudes and it imposes an environmental impact due to the large volume. The transport and disposal carries an extra cost proportional to the volume that should be minimized and, considering the high water content (close to 600% by mass of dry solids), the best option is the dewatering and drying. In this work we study in a laboratory scale the dewatering and drying of the sludge obtained in the water purification process at the Suquia plant of Aguas Cordobesas S.A. The influence of drying temperature and samples areas and volumes on drying time were analyzed, with the purpose of obtaining indicative values related to the dehydration process of the sludge. Obtained results show that the removal of water reduces sludge weight by 82%, constituting an interesting alternative treatment prior to transport and final disposal.

Keywords— Thermal behaviour, thermal contraction, forced and natural drying, industrial wastes

INTRODUCCIÓN

La elevada generación de lodos, tanto de plantas potabilizadoras como depuradoras es una problemática de gran interés en la actualidad. En el caso de las plantas potabilizadoras, estos lodos provienen del lavado de los filtros, los tanques de sedimentación o una mezcla de ambos

(Zhou et al., 2012), teniendo por lo general tratamientos inmediatos de filtración. En particular, el mayor impacto generado por estos lodos está relacionado con su volumen, por ejemplo en Francia se generan 63.800 ton/año (base seca) de lodos y en España se producen 120.000 ton/año de materia seca de este residuo, obteniéndose en proporciones que oscilan entre 0,05 y 0,09 kg de lodo seco por m³ de agua tratada (Armenter et al., 2002; Ramírez Zamora et al., 2008). También en América, por ejemplo en México, existen 372 plantas potabilizadoras las cuales en conjunto tratan alrededor de 109,8 m³/s de agua, y generan más de 200.000 ton/año de sólidos secos. En la provincia de Córdoba, la empresa Aguas Cordobesas S. A. genera

Dirección de contacto:

Daniel A. Glatstein, Av. Vélez Sarsfield 1611, Oficina IMPAS, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba. Tel 5353800, interno 836, email: dglatstein@unc.edu.ar.

aproximadamente 16.000 ton/año de lodo, cuyo contenido gravimétrico de humedad (en base al lodo seco) es, en promedio, del 600%.

El tratamiento de estos lodos requiere operaciones de homogenización, espesado, filtración y estabilización física, química y biológica previas a su disposición final (Metcalf y Eddy, 1995; Barrenetxea et al., 2003; Maldonado Cuesta, 2005; Méndez Lázaro, 2005; CEDEX, 2007). Por otro lado, la tendencia actual se encamina a encontrar un uso sustentable de los lodos bajo las normativas específicas ya que, por su elevado volumen, podría convertirse en un subproducto relevante en el proceso de potabilización de agua, además de reducir su impacto negativo como contaminante de las aguas subterráneas, en algunos cultivos o de la red trófica (Soliva y Huerta, 2005).

Las características físico químicas de este residuo semisólido dependen del agua natural utilizada para tal proceso, como así también de los compuestos químicos (floculantes, coagulantes) agregados para disminuir el tiempo del proceso y permitir la asociación de partículas más pequeñas. Debido a esto, la cantidad de lodo generada varía diariamente y, en mayor medida, estacionalmente. Los períodos de intensas lluvias provocan una resuspensión del material fino y en épocas de elevada temperatura, pueden ocasionarse floraciones algales que aumentan directamente la cantidad de material en suspensión a filtrar en las plantas de tratamiento.

Existen experiencias que demuestran la posibilidad de aprovechamiento y valorización de los lodos generados en plantas de tratamiento de agua. Por ejemplo, estudios realizados por Ramírez Zamora et al. (2008) en México, plantean que las cuatro mejores opciones de aprovechamiento de lodos, son: 1) aplicación en suelos; 2) elaboración de cemento-clinker; 3) elaboración de tabicones y productos cementantes, y 4) productos cerámicos.

Para el caso de estudio, se han analizado las características físicas, químicas y geomecánicas con el fin de encontrar distintos usos para estos lodos (Francisca et al., 2014; Ahmad et al., 2016). Si bien se determinó que podían ser utilizados en la construcción de terraplenes o rellenos no estructurales, en la actualidad estos lodos únicamente son transportados con un elevado costo para su disposición final, debido al bajo interés en la utilización de materiales residuales alternativos.

Sin embargo, gracias a su elevado contenido de agua, una opción para reducir el costo del transporte es el secado previo, por lo que el objetivo principal del trabajo es la evaluación del comportamiento volumétrico y de velocidad de secado de los lodos bajo distintas condiciones geométricas y energéticas. La estabilización del material mediante técnicas de secado económicas reduce el impacto volumétrico, disminuye los costos de transporte y permite una correcta disposición y usos posteriores.

MATERIALES Y MÉTODOS

El lodo utilizado fue obtenido en la Planta Potabilizadora Suquía de la empresa Aguas Cordobesas S.A. (Córdoba, Argentina), siendo este el residuo sólido obtenido en la

parte final del proceso de decantación, floculación, filtrado y centrifugado (Fig. 1). El agua utilizada en el proceso de potabilización es agua superficial que proviene fundamentalmente del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina), mientras que el lodo producido durante la coagulación se comporta como un fluido viscoso y de aspecto gelatinoso. Este material contiene óxidos e hidróxidos metálicos y compuestos orgánicos e inorgánicos, como microorganismos, arcilla y limo (Francisca et al., 2014).



Fig. 1. Ubicación de la Planta Suquía de la empresa Aguas Cordobesas S.A. e imagen del depósito de lodos.

Luego de pasar por una centrifugadora, el lodo adquiere un estado de mayor solidez. Las principales características físicas fueron analizadas siguiendo las normas internacionales (ASTM, 2007) y pueden encontrarse en la Tabla 1. Las propiedades estudiadas incluyeron granulometría, límites de Atterberg, y gravedad específica.

Se determinó gravimétricamente el contenido de materia orgánica a partir de la pérdida de peso por calcinación a 600 °C durante 90 minutos, del lodo previamente secado a 110±5 °C durante 48 horas. El contenido materia orgánica se determinó como el residuo obtenido luego de dicha calcinación.

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS RELEVANTES DE LOS LODOS.

Humedad (como % del lodo seco)	560-680	ASTM D2216-90
Arcillas (como % del lodo seco)	23	ASTM D422-63
Limos (como % del lodo seco)	77	ASTM D422-63
Arenas (como % del lodo seco)	0	ASTM D422-63
γ húmeda, g/cm ³	1,1	ASTM D4380-84
γ seca, g/cm ³	0,15-0,3	ASTM D4380-84
Límite Líquido	75-86	ASTM D-4318-84
Índice Plástico	0-3	ASTM D-4318-84
Agua (como % del lodo húmedo)	86,5	Gallardo et al., 1987
Mat. Orgánica (% del lodo húmedo)	4,25	Gallardo et al., 1987
Mat. Inorgánica (% del lodo húmedo)	9,25	Gallardo et al., 1987
Gs	2,1-2,3	ASTM D854-83

Con el fin de analizar el comportamiento frente al secado, los lodos fueron calefaccionados de manera forzada en estufas de cultivo reguladas a 27 °C +/- 0,5 °C y 37 °C +/- 0,5 °C. Las muestras fueron secadas hasta humedad constante, demorando entre 2 y 18 días, según el volumen de las muestras y la temperatura de ensayo. Para obtener la humedad total se secaron 100 gramos de muestra en horno a 110 °C +/- 5 °C por 5 días (ASTM, 2007).

Las muestras fueron colocadas en 6 recipientes de distinta área pero profundidad similar (1,1 cm +/- 0,4 cm), obteniéndose así 6 muestras por temperatura, 12 muestras en total. Se analizó además una muestra de mayor profundidad (9,3 cm) a 37 °C. Las distintas características de los recipientes utilizados se resumen en la Tabla 2.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECIPIENTES UTILIZADOS PARA EL SECADO.

Muestra	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)
A27	6,88	5,02
B27	8,55	6,89
C27	19,01	26,05
D27	23,76	20,43
E27	59,45	65,39
F27	66,19	46,99
A37	6,88	5,02
B37	8,55	6,89
C37	19,01	26,05
D37	23,76	20,43
E37	59,45	65,39
F37	66,19	46,99
G37	67,93	631,74

La velocidad de secado (N^*) se calcula usualmente como

$$N^* = \frac{-W_s \Delta x}{A \Delta t} \quad (1)$$

donde W_s es la masa de lodo seco, Δt es el tiempo de ensayo, A el área de intercambio considerada y Δx la variación en la humedad. Δx se calcula mediante la siguiente ecuación

$$\Delta x = \frac{W_H - W_s}{W_s} \quad (2)$$

donde W_H es la masa del lodo húmedo.

Este análisis resulta complejo en este caso de secado, debido a que el área inicial considerada tiende a decrecer a medida que evoluciona el ensayo. Por esta razón la velocidad de secado se calcula sin considerar el área, según

$$N^* A = N = \frac{-W_s \Delta x}{\Delta t} \quad (3)$$

Durante el secado de un sólido ocurren distintos procesos, diferenciados por la variación en la velocidad de secado, lo que se identifica con distintas zonas en una curva de secado. Inicialmente, existe una etapa de acondicionamiento, generalmente de poca duración, que se extiende hasta que el sólido alcanza el equilibrio térmico dado entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. A partir de este punto, la velocidad

de secado se mantiene constante, y la humedad que se pierde se encuentra únicamente influenciada por las condiciones externas (temperatura, humedad, circulación de aire). Finalmente, se van produciendo puntos secos en la superficie del sólido hasta que la superficie está completamente seca y, a partir de dicho punto, la difusión de la humedad desde el interior del sólido disminuye aún más la velocidad de secado, que continua hasta el punto E de equilibrio. Durante este a velocidad de secado se vuelve decreciente, se evapora la humedad ligada y predominan las condiciones internas.

Para los análisis comparativos del presente trabajo, se utilizaron los valores obtenidos durante el período de velocidad de secado constante, al ser éste el más representativo del proceso.

RESULTADOS

Tiempo de secado

En la Fig. 2 se presenta la variación del peso de las muestras normalizado a sus pesos iniciales (W_H/W_{Hi}), en función del tiempo. Las muestras secadas a 27 °C (Fig 2.a) demoraron un tiempo mayor que aquellas a 37 °C (Fig. 2.b), como era esperado, aunque lo significativo es que las primeras alcanzaron un peso constante entre 50 y 90 horas de ensayadas; mientras que las segundas demoraron entre 30 y 50 horas hasta alcanzar un peso constante. Es notable como una disminución de 10 °C puede casi duplicar el tiempo de secado.

De estos resultados se observa que el tiempo de secado depende en primera instancia del volumen total de lodo y de la temperatura de secado, aunque esto no explica todas las tendencias encontradas. Comparando las distintas series dentro de la Fig. 2 (a) podemos observar como la muestra F27 alcanza un peso constante más rápido que la muestra C27 o incluso que la muestra B27, aún teniendo un volumen 2 y 8 veces mayor, respectivamente. Esto se debe a la elevada área inicial de la muestra F27 en relación a las otras muestras, ya que las profundidades de todas son similares. Es decir que a medida que la relación Volumen/Área aumenta, también lo hace el tiempo de secado. Este análisis realizado para las muestras ensayadas a 27 °C también resulta válido para las muestras idénticas ensayadas a 37 °C (Fig. 2.b).

En la Fig. 2.c puede observarse que el tiempo de secado para la muestra G37 fue significativamente mayor al resto, alcanzando pesos constantes luego de las 360 horas (15 días) de ensayo. Esta muestra tiene un área superior similar a la muestra F37, secada a la misma temperatura, pero un volumen 13 veces superior. De esta manera se verifica que además de la temperatura de secado y el área superficial, el volumen total incide también de manera directa en el secado de los lodos.

En todas las muestras ensayadas se alcanzaron reducciones mayores al 80% de la masa total, lo que a su vez implica que la humedad inicial se redujo en un 95%.

Velocidad de secado

En la Fig. 3 se muestran las velocidades de secado para todas las muestras ensayadas, presentando la Fig. 3.a los resultados de las muestras ensayadas a 27 °C y la Fig. 3.b aquellos correspondientes a las muestras ensayadas a 37 °C. En ambas imágenes pueden advertirse las distintas zonas mencionadas en la sección de Materiales y Métodos, con mayor o menor relevancia para cada caso. Puede notarse también que las velocidades más elevadas se corresponden con los recipientes de baja profundidad y mayor superficie, o lo que es lo mismo, de mayor relación Área/Volumen.

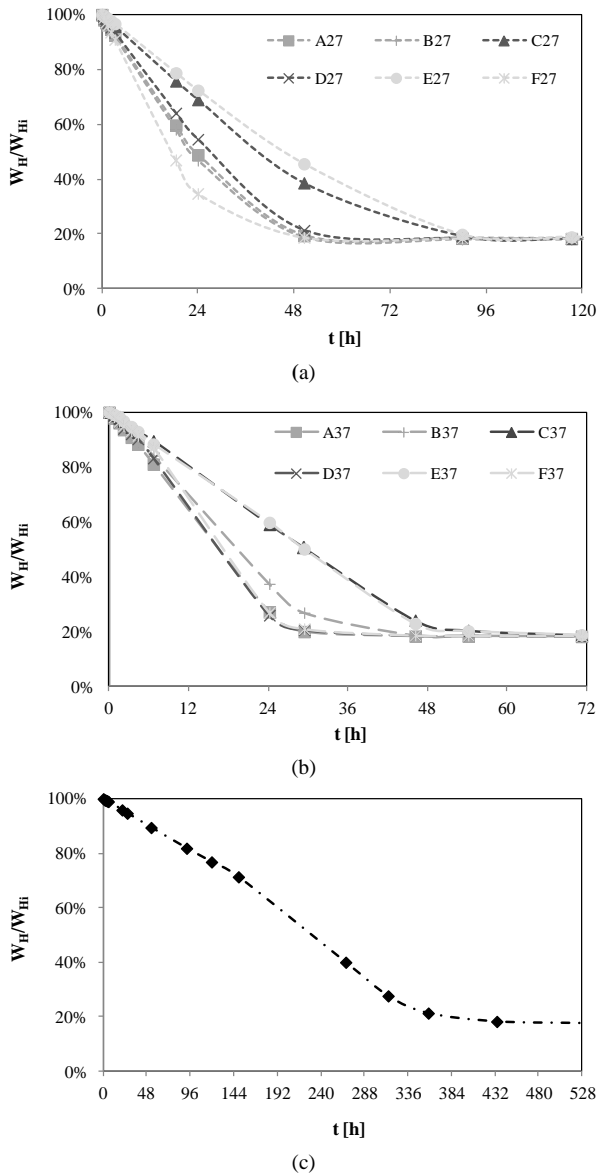


Fig. 2. Variación del peso de las muestras normalizado a sus pesos iniciales (P/P_i), (a) recipientes pequeños a 27 °C, (b) recipientes pequeños a 37 °C, (c) recipiente de gran volumen a 37 °C. Nótese la variación en la escala temporal.

En la Fig. 4 se presenta la comparación de algunas velocidades de secado de muestras de áreas similares ensayadas a distintas temperaturas. En la Fig. 4.a se presenta el resultado de seis muestras de profundidades

similares y con tres áreas y dos temperaturas distintas. Podemos notar como la velocidad de secado es independiente de la temperatura para las muestras más pequeñas, pero se vuelve cada vez más dependiente a medida que se aumenta el tamaño. Por otro lado, en la Fig. 4.b se presenta la comparación de tres muestras de una misma área superior, pero teniendo una de ellas una profundidad 13 veces mayor. Aquí puede notarse que independientemente del volumen, las muestras secadas a la misma temperatura tienen un comportamiento de secado similar.

Contracción térmica

A medida que las muestras son secadas se produce una contracción volumétrica que modifica la superficie de intercambio de materia y energía, la profundidad del sólido y el volumen total del mismo. En la Tabla 3 se muestran las variaciones producidas en cada aspecto.

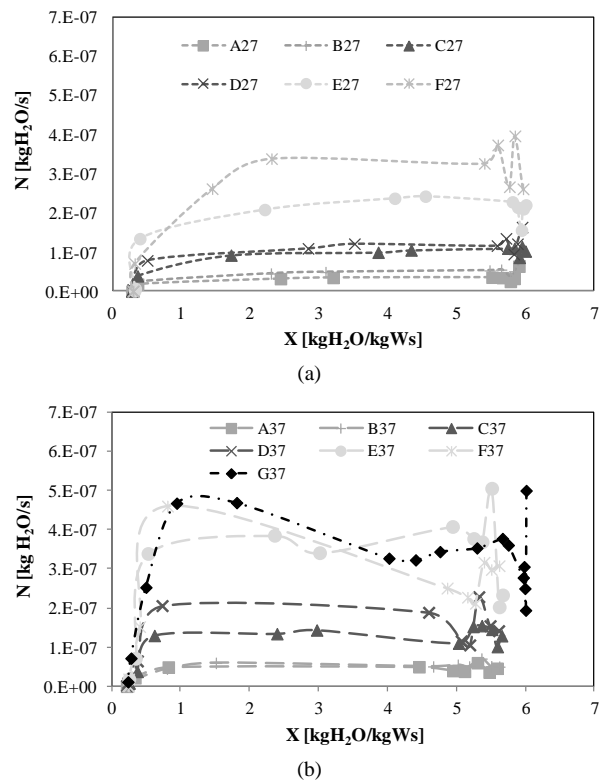


Fig. 3. Variación de la velocidad de secado en función de la humedad para (a) recipientes a 27 °C, (b) recipientes a 37 °C.

Estos resultados ponen de manifiesto la importancia económica que representa el secado, ya que además de lograr una disminución superior al 80% en la masa de lodo, también obtenemos una disminución similar en el volumen de los mismos. Esto indica que la contracción se produce de manera volumétrica y no radial o longitudinalmente. Económicamente esto implica que se reducirían los costos de transporte, debido a que la logística de los lodos se calcula en función del volumen de los mismos, en vez de la masa.

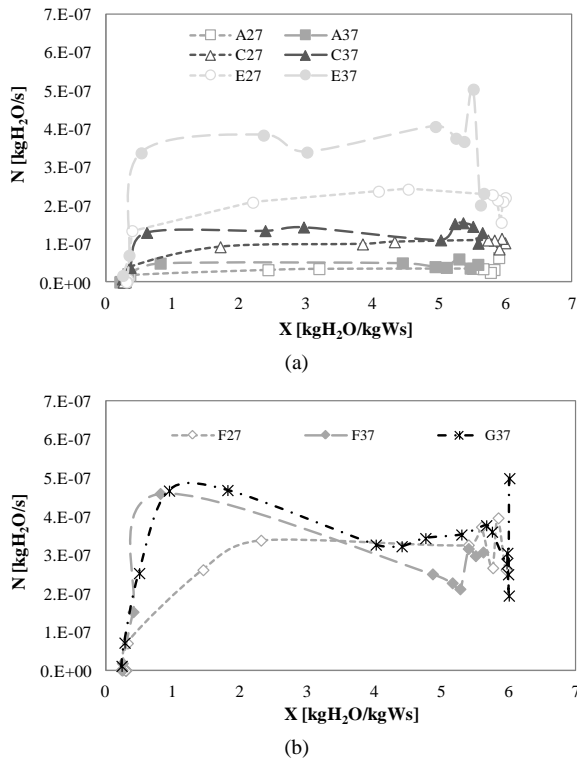


Fig. 4. Variación de la velocidad de secado en función de la humedad a distintas temperaturas.

TABLA 3. VARIACIONES PORCENTUALES DE LAS DIMENSIONES DE LOS LODOS.

Muestra	Variación Profundidad	Variación Área	Variación Volumen
A27	36,99 %	67,12 %	79,28 %
B27	40,74 %	68,73 %	81,47 %
C27	43,43 %	66,95 %	81,31 %
D27	44,19 %	66,47 %	81,29 %
E27	46,36 %	63,87 %	80,62 %
F27	49,30 %	66,50 %	83,01 %
A37	36,99 %	68,33 %	80,04 %
B37	33,33 %	63,88 %	75,92 %
C37	43,80 %	66,93 %	81,41 %
D37	41,86 %	66,14 %	80,32 %
E37	40,91 %	67,32 %	80,69 %
F37	43,66 %	65,46 %	80,54 %
G37	50,71 %	73,91 %	87,14 %

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

El período de velocidad de secado constante es el más importante en cuanto al diseño ingenieril, ya que se encuentra influenciado por parámetros extrínsecos del cuerpo a secar. Es por esto que los análisis de secado se realizan generalmente en función a la velocidad de secado constante.

En la Fig. 5 se pueden observar las velocidades de secado constantes en función de las áreas iniciales en las caras superiores de las muestras. Se observa una fuerte relación entre la velocidad y el área, y existe también una marcada disminución de la velocidad de secado con la disminución de la temperatura. Es notable como la muestra G37, de

volumen sustancialmente mayor al resto, muestra una velocidad de secado semejante a la muestra de similar área superior, secada a la misma temperatura.

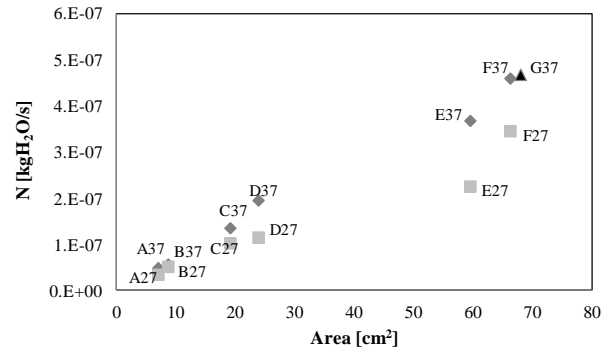


Fig. 5. Velocidades de secado constante en función del área de la cara superior inicial de los recipientes.

Debido a la estrecha relación entre la velocidad de secado constante y el área, se normalizó la primera en función del área superior inicial. Como se discutió anteriormente, existe la dificultad de determinar el área a utilizar en el cálculo, debido a la contracción volumétrica que presenta la muestra. En la Fig. 6 puede observarse que la mejor relación fue encontrada entre la velocidad de secado normalizada y la relación Área/Volumen, considerando el área inicial de las caras superiores de los recipientes. De esta figura se desprende que la velocidad de secado normalizada se encuentra relacionada con la profundidad de las muestras, ya que

$$\frac{A}{V} = \frac{1}{\text{Profundidad}} \tag{4}$$

es decir que un aumento de la profundidad disminuye la velocidad de secado por unidad de área.

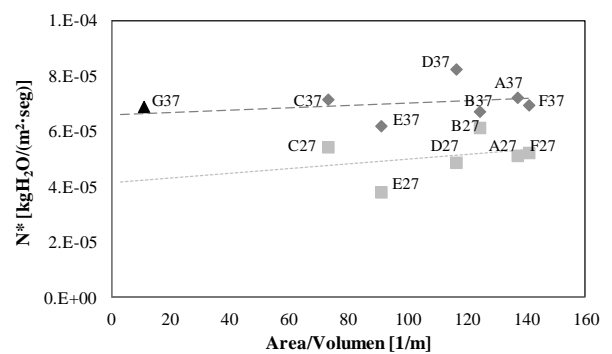


Fig. 6. Velocidades de secado constante normalizadas en función de la relación Área/Volumen. La velocidad de secado se normalizó por el área de la cara superior de los recipientes.

Por otro lado, si consideramos la velocidad de secado normalizada, pero teniendo en cuenta la totalidad del área de intercambio de masa y calor (caras superior, inferior y lateral de las muestras), obtenemos una relación aún más estrecha entre N* y la profundidad. En la Fig. 7 puede observarse que existe una relación inversa no lineal entre la

velocidad de secado y la profundidad de la muestra. Luego de analizar distintos modelos se encontró que aquel con menor error porcentual (8,3% en promedio para las muestras de 37 °C y 9,4% para las muestras de 27 °C) corresponde a un modelo logarítmico.

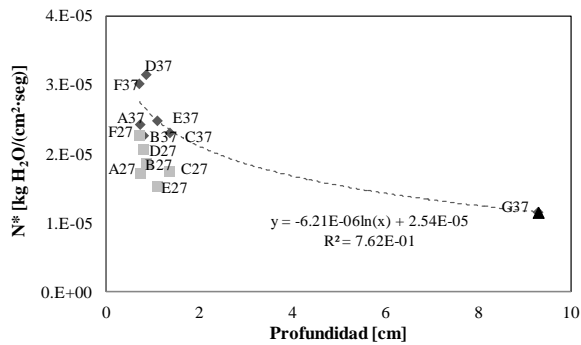


Fig. 7. Velocidades de secado constante normalizadas por el área total inicial, en función de la relación Área/Volumen. La velocidad de secado se normalizó por el área total de intercambio de masa y energía. La línea punteada representa la regresión logarítmica de las series a 37 °C.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta resultados de ensayos de secado de lodos obtenidos en la planta de purificación de agua Suquía, de la empresa Aguas Cordobesas S.A. Las principales conclusiones del trabajo se resumen a continuación.

- El tiempo de secado depende fundamentalmente de la temperatura y del volumen de sólido a secar. La influencia de la temperatura se vuelve más evidente a medida que aumenta el volumen, la profundidad y/o el área de las muestras a secar, siendo casi nula para muestras de 5 cm³ y llegando a casi duplicar el tiempo cuando la temperatura pasa de 37 °C a 27 °C para muestras de 50 cm³.

- La diferencia de 10 °C en las temperaturas de secado no evidencia una diferencia entre la pérdida de masa porcentual o la pérdida de humedad final, llegando a valores cercanos a 82% y 95%, respectivamente, para ambas temperaturas. La importancia de la temperatura sí queda demostrada en el tiempo necesario para el secado.

- El período de velocidad de secado constante es el más importante en el secado de sólidos, tanto por la magnitud como por la velocidad en sí. Se encontró que la velocidad de secado constante varía linealmente con el área inicial superficial y de manera logarítmica con la profundidad de las muestras, según se normalicen las velocidades o no.

- El secado produjo una reducción en la masa de lodo del 82%, y una contracción volumétrica cercana al 85%. Debido a que el transporte de los lodos está relacionado con el volumen de los mismos, el secado previo resulta una buena alternativa para reducir los costos de dicho transporte. Sin embargo, es necesaria una evaluación global del proceso para analizar la factibilidad económica del mismo.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado mediante un convenio de participación entre Aguas Cordobesas S.A. y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNC).

REFERENCIAS

- [1] Ahmad T., Ahmad K. y Alam M. (2016), "Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options", *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950 – 955.
- [2] ASTM (2007), *Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [3] Armenter F. J. L., Cristiá R. J., Cusidó F. J. A., Artega N. F. y Cremades O. L. (2002), "Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica", *Tecnología del agua*, 232, 26-33
- [4] Barrenetxea O., Serrano C. P., Delgado A. G., Rodríguez M. N., Rodríguez F. V. y Blanco J. A. (2003), *Contaminación Ambiental: una morada desde la química*. Ed. Thomson, Madrid.
- [5] CEDEX (2007), *Lodos de depuradoras*, Centro de Estudios y Experimentación de obras públicas – Gobierno de España, Madrid.
- [6] Francisca F. M., Bertolino S., Cámara O. y Van De Velde G. (2014), "Comportamiento de limos mezclados con lodos ricos en diatomeas y materia orgánica", *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 32, 1–11.
- [7] Maldonado Cuesta M. (2005), "Heliantis, una solución energéticamente aceptable para el secado de fangos", *DYNA*, 80, 31-34.
- [8] Mendez Lázaro A. (2005), "Obtención de biocombustibles por tratamiento térmico de lodos de depuradora". *IV Jornadas Abulenses de Energías Renovables*, España, 8-10 abril 2005.
- [9] Metcalf y Eddy (1995), *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (3ra. Edición), Ed. Mc Graw-Hill, España.
- [10] Ramirez Zamora R. M., Ayala F. E., García L. C., Moreno A. D. y Schowenaars R. (2008), "Optimization of the Preparation Conditions of Ceramic Products using Drinking Water Treatment Sludges", *Journal of environmental science and health part a-toxic/hazardous substances & environmental engineering*, 43 (13), 1562-1568.
- [11] Soliva M. y Huerta O. (2005), *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas*, Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Barcelona.
- [12] Zhou Z., Yang Y., Li X., Gao W., Liang H. y Li G. (2012), "Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during treatment of low temperature and micro-polluted water", *Journal of Environmental Sciences*, 24 (6), 1014-1020.