

Evaluación de la eficiencia de geocontenedores en el tratamiento de lodos producidos en un frigorífico. Caso de aplicación a escala real en la provincia de Buenos Aires, Argentina

J. Herrera, Maccaferri de Argentina SA, Buenos Aires, Argentina
C. Ojeda, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
C. Barreto, Ambiental Labcon SA, Buenos Aires, Argentina
C. Moreno, MACS SA, Buenos Aires, Argentina
P. J. Santos Junior, Maccaferri do Brasil, Jundiaí, Brasil

RESUMEN

La industria frigorífica argentina es una de las industrias más grandes a nivel regional, habiéndose contabilizado 387 mataderos-frigoríficos en el 2017. Más del 50% de los frigoríficos emplean lagunas de estabilización en el tratamiento de sus efluentes líquidos; este tipo de tratamiento, al igual que todos los tratamientos existentes, genera lodo, el cual es necesario y frecuentemente debe ser retirado de las lagunas. Los geocontenedores (GCs) son una tecnología económica y técnicamente viable para contener y deshidratar este lodo; lamentablemente, no hay referencias de su uso en el sector frigorífico local. Con el objetivo de evaluar la eficiencia de esta tecnología se realizó el monitoreo de los trabajos de extracción, contención y deshidratación de lodos con GCs en un frigorífico localizado en la provincia de Buenos Aires. En muestras de slurry y del líquido filtrado se midió pH, sólidos totales (ST) y sedimentables en 10 minutos y 2 horas, DBO₅ y DQO, fósforo total (P-total), nitrógeno amoniacal, orgánico y total Kjeldahl, y se estableció, para esta experiencia, las siguientes reducciones de concentración: 99% en sólidos sedimentables en 10 minutos y 2 horas; para DBO₅ y DQO 94% y 96%, respectivamente; 67% en P-total; 7%, 56% y 31% respectivamente para nitrógeno amoniacal, orgánico y total Kjeldahl. También se evaluaron otros parámetros típicamente vinculados con la eficiencia de los GCs en la deshidratación de lodos: eficiencia de filtración y de deshidratación.

RESUMO

A indústria frigorífica argentina é uma das maiores indústrias em nível regional. Mais de 50% dos frigoríficos usam lagoas de estabilização no tratamento de seus efluentes líquidos. Este tipo de tratamento gera lodo, que deve ser removida das lagoas. Os geocontainers (GCs) são uma tecnologia economicamente e tecnicamente viável para conter e desidratar esse lodo. Para avaliar a eficiência dessa tecnologia, o monitoramento da desidratação do lodo com geocontenedores foi realizado em um frigorífico localizado em Buenos Aires. Em amostras de lodo (mistura) e líquido filtrado, pH, sólidos totais (ST) e sedimentáveis em 10 minutos e 2 horas, DBO₅ e DQO, fósforo total (P-total), nitrogênio amoniacal, Kjeldahl orgânico e total, foram medidos, e foi estabelecido, para esta experiência, as seguintes reduções de concentração: 99% em sólidos sedimentáveis em 10 minutos e 2 horas; para DBO₅ e COD 94% e 96%, respectivamente; 67% no P-total; 7%, 56% e 31%, respectivamente, para nitrogênio amoniacal, Kjeldahl orgânico e total. Outros parâmetros tipicamente ligados à eficiência dos GCs na desidratação de lodo também foram avaliados: eficiência de filtração e desidratação.

Palabras clave: geocontenedor, lodo, deshidratación, eficiencia, frigorífico

1. INTRODUCCIÓN

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (OCDE/FAO, 2018), proyectan para el periodo 2018-2027 un aumento del 15% en el consumo mundial de carne y pescado; con un incremento del 3,5% en el consumo per cápita de carne vacuna, acentuado principalmente en China. Para el mismo periodo, también prevén que los países en desarrollo, principalmente Argentina, Brasil, China, Paquistán y Turquía incrementaran un 21% su producción de carne bovina, incremento que a su vez representará el 75% del aumento mundial en la producción de carne bovina. Inexorablemente, esto implicará un mayor consumo de agua y una mayor generación de efluentes por parte del sector frigorífico local.

Como es sabido, cualquier tipo de tratamiento de efluentes líquidos genera lodo. Según Masters y Ela (2008), la cantidad de lodo producido puede ser de hasta el 2% del volumen de efluente, y como el lodo puede tener hasta un 97% de agua, es necesario extraer la mayor cantidad de agua como sea posible para disminuir los costos de su disposición final. Herrera (2019) estimó que el volumen de efluente líquido generado por el sector frigorífico argentino se ubica en el orden de los 16.870.000 m³/año, por lo tanto, si se considera que el volumen de lodos equivale al 2% de este volumen, se obtiene un

volumen de lodo de 337.400 m³/año. En Argentina, las lagunas de estabilización son empleadas por más del 50% de los frigoríficos para tratar sus efluentes líquidos (Herrera, 2019); naturalmente, al interior de las lagunas se acumula lodo, el cual tiene que ser removido periódicamente para evitar que la capacidad de las lagunas se vea comprometida debido a la reducción de su volumen efectivo (Worley et al., 2007).

En lo que concierne al uso de geocontenedores (GCs) para la deshidratación de lodo generado en lagunas de tratamiento de efluentes bovinos, o su uso para el tratamiento de estiércol y purín fresco, existe un número limitado de reportes en la literatura especializada; sin embargo, los escasos reportes que existen permiten conjeturar que esta tecnología es técnicamente viable para el tratamiento de estos lodos y deyecciones. Los estudios realizados empleando GCs, a escala real, para deshidratar lodo procedente de lagunas de tambos (establecimientos de ordeño de ganado vacuno) arrojan importantes tasas de separación o reducción, o retención de sólidos totales (ST) y nutrientes, por ejemplo, Mukhtar et al. (2007) informan una *reducción de la concentración* de ST del 93,5%, 85% para fósforo (P) soluble y 96% para P-total, 84% para nitrógeno total Kjeldhal (NTK), en un efluente (lodo del fondo y efluente superficial mezclados a través de una fuerte agitación) proveniente de una laguna primaria que integra el sistema de tratamiento de aguas residuales de un tambo; Worley et al. (2008) informan eficiencias de separación del 90% al 97% para ST, 80% al 86% para NTK, 92% a 100% para N-orgánico, 79% al 97% para P (expresado como P₂O₅), 24% al 36% para potasio (K) (expresado como K₂O), para el lodo extraído del fondo de una laguna primaria para tratamiento de efluentes de un tambo. Debe aclararse, que la eficiencia de separación reportada por Worley et al. (2008) está evaluada considerando la *masa total* de sólidos y nutrientes que ingresan y egresan de los GCs, por lo tanto, la eficiencia de separación informada representa el funcionamiento global del sistema. Una comparación entre la concentración de los nutrientes y sólidos que ingresan y egresan de los GCs, sólo puede ser considerada como una instantánea del sistema. Por otra parte, en estudios realizados a escala y en laboratorio, con lodos provenientes de lagunas de tambos, Cantrell et al. (2008) encontraron que la eficiencia del sistema medida considerando la masa de sólidos y nutrientes arroja, generalmente, mejores valores de rendimiento del sistema en comparación con los rendimientos obtenidos en evaluaciones que consideran únicamente los cambios en la concentración de los sólidos y nutrientes.

Por su parte, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés, 2017) a través de su agencia de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés), sugiere, entre otras tecnologías, el empleo de GCs para realizar la separación entre sólidos y líquidos como parte del tratamiento de corrientes de agua residuales con contenido de estiércol; además, indica que con esta tecnología se puede alcanzar una eficiencia de separación de sólidos en el rango de 50% a 98%.

En este estudio, se evalúa la eficiencia de los GCs para deshidratar lodos de una laguna aireada; también, se evalúa la reducción en la concentración de sólidos y nutrientes del slurry filtrados a través de GCs. Todas las determinaciones se realizaron sobre lodos almacenados en el interior de una laguna aireada a través de aireadores flotantes; esta laguna es parte del sistema de tratamiento de efluentes líquidos de un frigorífico localizado en la provincia de Buenos Aires.

2. GENERALIDADES DE LA DESHIDRATACIÓN DE LODOS CON GCS

La aparición de los GCs en la escena de la ingeniería está vinculada a aplicaciones en hidráulica marina, y puede situarse en 1957, pero sólo fue hacia finales de la década del 60' que su desarrollo e implementación empezó a crecer (Koerner, 2012). "Los GCs se utilizaron por primera vez para deshidratar lodos de residuos a mediados de la década de 1990, donde se realizaron ensayos que involucraban la deshidratación de lodos de aguas residuales municipales" (Lawson, 2008). No obstante, el tiempo transcurrido desde las primeras aplicaciones de deshidratación de lodos y sedimentos, hoy día los GCs aún son considerados como tecnologías emergentes para el tratamiento y disposición de lodos (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015).

La deshidratación de lodos y sedimentos con GCs se consigue introduciendo estos materiales por bombeo en el interior del geocontenedor, y proveyendo el tiempo necesario para que el exceso del agua libre y el agua de poro escape del lodo o sedimento y se filtre a través del geotextil que conforma las paredes del geocontenedor. La corriente que se bombea, integrada por lodo o sedimento y agua, se denomina generalmente como slurry o mezcla. La apariencia final del residuo deshidratado se aprecia en la Figura 1.

En la actualidad, se acepta unánimemente que en el proceso de filtración hay dos barreras que deben ser atravesadas por el agua a drenar: el geotextil que forma las paredes del geocontenedor y la *torta de filtro* (filter cake) formada por el lodo. También se acepta que la eficiencia de la filtración y deshidratación está principalmente condicionada por la calidad de la torta de filtro y del acondicionamiento químico que se hace al lodo previamente a ser introducido al tubo. Por lo general, en toda aplicación de deshidratación de barros, biosólidos y sedimentos contaminados de grano fino (limo y arcilla) se emplean coagulantes y/o floculantes.



a) Lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales de Esperanza, Pcia. de Santa Fe



b) Sedimento contaminado de la laguna Chiquichano, Trelew, Pcia. del Chubut

Figura 1. Residuos deshidratados con geocontenedores

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se dividió en dos etapas: 1) evaluación de la capacidad de los GCs para reducir la concentración de sólidos y nutrientes de la corriente de slurry; 2) evaluación de la eficiencia del GCs para filtración y deshidratación de lodos. El lodo objeto de este estudio se encuentra almacenado en el interior de una laguna aireada, la cual se encuentra antecedida por tres lagunas anaeróbicas parcial y totalmente colmatadas por lodo, una reja para separación de sólidos, y un tamiz estático. A este sistema de tratamiento ingresan todos los efluentes que se producen en el proceso industrial del frigorífico (línea verde y línea roja); además, de los efluentes provenientes de la limpieza de instalaciones y quipos, limpieza de corrales, lavado de camiones, e instalaciones sanitarias. La limpieza de corrales consiste en el lavado de purines (estiércol y orina) hacia canales perimetrales a los corrales; canales que a su vez descargan los purines sin ningún tratamiento en las lagunas anaeróbicas.

3.1 Reducción de la concentración de nutrientes y sólidos sedimentables

El lodo fue bombeado desde la laguna de aireación, con un caudal promedio de 45 m³/h, hacia tres GCs localizados sobre una celda de contención de líquidos impermeabilizada con geomembrana de polietileno de alta densidad de 1,0 mm de espesor; como material de filtración se instaló entre la geomembrana y los GCs un geocompuesto drenante compuesto por la asociación de una geonet y un geotextil. El lodo fue acondicionado químicamente antes de su ingreso a los GCs, con la adición promedio de 50 ppm de cloruro férrico (FeCl₃) y 100 ppm promedio de polímero catiónico. Debido a que inevitablemente durante el bombeo se generan cambios en la concentración de sólidos en el slurry, la dosis del coagulante y floculante se ajustó in situ apoyándose para tal fin en el ensayo de cono Imhoff, el cual permite establecer, con cierto grado de precisión, un marco cuantitativo para valorar la calidad del acondicionamiento químico del slurry. En la Figura 2 se aprecia parte de los equipos e instalaciones mencionadas.



a) Geocontenedores y celda de contención de líquido filtrado



b) Unidad de coagulación, floculación y serpentín de mezcla

Figura 2. Vista general de las instalaciones y equipos

Se define *evento de llenado*, a la operación de bombeo de slurry por el lapso de 4 o 5 horas durante un día. Para tres eventos de llenado, con separación de 9 y 4 días entre sí, se tomaron muestras de slurry (MS) de la línea de conducción antes de la adición del coagulante y floculante; también, se tomaron muestras del líquido filtrado (MLF) que goteaba a través de las paredes del geocontenedor. Todas las muestras fueron tomadas bajo la metodología de muestra compensada para un evento de llenado, respetando en la medida de lo posible la toma de muestras a cada 1 hora, y garantizando que la fecha de toma de la muestra coincidiera con el avance del retiro de lodo de tres sectores de la laguna: ingreso a la laguna, zona central de la laguna, y salida de la laguna. Si bien, en el proyecto se emplearon tres GCs, todas las determinaciones fueron realizadas empleando únicamente el líquido filtrado de dos GCs. Las muestras de líquido filtrado se recolectaron desde distintos sectores del perímetro de los dos GCs, y se mezclaron en partes iguales para obtener una única muestra; las muestras fueron tomadas empleando un embudo plástico que, al situarlo en contacto con el geotextil, sin ejercer presión sobre el geotextil, permitía encausar el líquido filtrado hacia el recipiente de recolección. Las muestras de slurry y líquido filtrado fueron conservadas en recipientes adecuados a 4°C hasta su ingreso al laboratorio, el cual se hizo en un periodo no mayor a dos horas de finalizar la toma de muestras. En campo se midió pH, los demás parámetros fueron analizados en laboratorio siguiendo lo establecido en los Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

Los resultados de los parámetros analizados en laboratorio se emplearon para estimar la capacidad de los CGs para reducir la concentración de sólidos y nutrientes. La reducción en la concentración RC, se evalúa a través de la Ecuación 1, donde C_{MS} es la concentración del parámetro en el slurry y C_{MLF} es la concentración del parámetro en el líquido filtrado. La Ecuación 1 ha sido empleada en estudios realizados por Mukhtar et al. (2007) y Cantrell et al. (2008).

Se han evaluado los siguientes parámetros de calidad del agua: pH, sólidos sedimentables en 10 minutos y 2 horas, DBO₅ y DQO, fosforo total (P-total), nitrógeno amoniacal (N-amoniacal), orgánico (N-orgánico) y total Kjeldahl (NTK).

$$RC (\%) = \frac{C_{MS} - C_{MLF}}{C_{MS}} \times 100 \quad [1]$$

Respecto al tipo de GCs empleados, la Tabla 1 presenta las propiedades mecánicas e hidráulicas del geotextil tejido de polipropileno que se utilizó para su fabricación. Cada geocontenedor alcanzó un volumen nominal de 74 m³, y contó con dos puertos para llenado.

Tabla 1. Propiedades del geotextil tejido

Ensayo	Método ASTM	Unidad	Media	SD
Resistencia a la tracción (longitudinal)	D4595	kN/m	91,22	1,38
Elongación (longitudinal)	D4595	%	11,45	0,10
Resistencia a la tracción (transversal)	D4595	kN/m	136,54	2,28
Resistencia al punzonado CBR	D6241	N	8807	204
Tasa de flujo	D4491	L/m ² /min	1.431,17	26,83
AOS	D4751	mm	0,344	0,045
Masa unitaria	D5261	g/m ²	511,7	3,89

SD: desviación estándar; min: minuto

3.2 Eficiencia de deshidratación y filtración

Dentro de los parámetros medidos para el slurry y el líquido filtrado, se encuentran los sólidos totales ST, los cuales se emplean para evaluar la eficiencia de filtración EF, a través de la Ecuación 2, donde $ST_{inicial}$ corresponde a los sólidos totales en la muestra de slurry extraída de la tubería de conducción antes de ser acondicionada químicamente, y TS_{final} corresponde a los sólidos totales en la muestra de líquido filtrado recolectada al exterior de las paredes del geotextil que forma los GCs, según se describió en 3.1.

$$EF (\%) = \frac{TS_{inicial} - TS_{final}}{TS_{inicial}} \times 100 \quad [2]$$

La eficiencia de deshidratación ED, se evalúa empleando la Ecuación 3, donde $PS_{inicial}$ y PS_{final} son el porcentaje total de sólidos en el lodo antes y después de la deshidratación, respectivamente. $PS_{inicial}$ corresponde a la concentración media de sólidos en peso, medida en el lodo *tal cual como se encuentra al interior de la laguna* (no se debe confundir con el contenido de sólidos en la muestra de slurry). PS_{final} corresponde a la concentración media de sólidos, en peso, medida en el lodo que se encuentra al interior de los GCs transcurridos 20, 50, 80 y 124 días desde el último evento de llenado. Las ecuaciones 2 y 3 fueron definidas por Moo-Young et al. (2002 a-b).

$$ED (\%) = \frac{PS_{final} - PS_{inicial}}{PS_{inicial}} \times 100 \quad [3]$$

Para evaluar el PS_{final} , se extrajeron muestras de lodo del interior del geocontenedor a lo largo de un periodo de 124 días. Las muestras se extrajeron a la profundidad de $0,3H$ y $0,5H$, siendo H la altura del geocontenedor al momento de la toma de la muestra. Todas las muestras fueron envasadas en bolsas herméticas para su transporte al laboratorio (ver Figura 3); posteriormente, se mezclaron en el laboratorio para seleccionar una muestra representativa a través de la técnica de cuarteo. Sobre cada muestra se determinó el contenido de humedad H (expresado como un porcentaje del total de la masa de la muestra húmeda) según ASTM D2974/14-Método A-6.1, a su vez, PS se determinó de forma indirecta como $PS (\%) = 100 - H(\%)$. Se aclara, que PS también puede obtenerse directamente siguiendo el procedimiento establecido en SM2540G, similar al indicado en ASTM D2974/14. Siguiendo las recomendaciones de ASTM D2216/10, los primeros ensayos de humedad se realizaron por duplicado, con temperaturas de $60^{\circ}C$ y $110^{\circ}C$ respectivamente, verificándose que no había diferencias apreciables en los valores obtenidos para la humedad (diferencia menor al 2%); por lo tanto, se descartó que hubiese un contenido significativo de materia orgánica en las muestras y se continuó con la realización de los ensayos a temperatura de $110^{\circ}C$.



a) Recuperación del lodo extraído del interior del geocontenedor con un tubo de 4" hincado a presión



b) Muestras de lodo envasadas en bolsas herméticas

Figura 3. Extracción de muestras de lodo del interior del geocontenedor

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Reducción de la concentración de nutrientes y sólidos sedimentables

En la Tabla 2 se presentan las concentraciones registradas para cada parámetro en las muestras de slurry MS y líquido filtrado MLF para cada evento de llenado. Cada evento de llenado está indicado con el número 1, 2 y 3, respectivamente.

Especial atención merece la concentración del N-amoniacoal, la cual, en promedio, duplica la concentración del N-orgánico para las muestras MS y MLF en los tres eventos de llenado, excepto en MS2 y MS3. El N-amoniacoal está estrechamente relacionado con purines frescos (mezcla de orina y estiércol); además, el N-amoniacoal es altamente soluble en agua, por lo tanto, difícilmente puede ser retenido por la torta de filtro y el geotextil. Las elevadas concentraciones de N-amoniacoal están explicadas por el ingreso hasta la laguna aireada, de la cual se extrajo el lodo, de efluente sin tratamiento específico para eliminar el N-amoniacoal. Valga mencionar que el N-amoniacoal proviene de la rápida descomposición por hidrólisis enzimática que experimenta la urea presente en la orina procedente del lavado de corrales y del servicio de sanitarios para operarios del frigorífico. También, se debe mencionar que el NTK está compuesto por nitrógeno orgánico y amoniacoal, por lo tanto, considerando que prima la concentración de N-amoniacoal sobre la concentración de N-orgánico, es de esperarse que el valor de RC sea bajo para el NTK, al igual que para el N-amoniacoal debido a su solubilidad en agua.

Cabe mencionar, que los sólidos sedimentables en dos horas, el pH, la DBO_5 y DQO, en todas las muestras MLF, tienen concentraciones inferiores a los límites admisibles establecidos en la Resolución 336/2003 de la provincia de Buenos Aires para su vertido en colectoras cloacales, conductos pluviales o cuerpo de agua superficial; excepto la DBO_5 en la muestra MLF1 y MLF2 que excede el valor límite establecido (50 mg/L) para vuelco en pluviales o cuerpo de agua superficial, y la DQO en la muestra MLF1 que también excede el valor límite establecido (250 mg/L) para vuelco en pluviales o cuerpo de agua superficial. Los demás parámetros, fósforo total, N-amoniacoal, N-orgánico y NTK, en todas las muestras MLF, exceden los límites admisibles establecidos por dicha Resolución.

Tabla 2. Concentraciones registradas en cada evento de llenado

Parámetro	Unidad	Standard Methods	MS1	MLF1	MS2	MLF2	MS3	MLF3
pH		4500-HB	6,95	7,18	7,29	6,94	6,63	6,81
Sólidos sedimentables 10'	ml/10'	2540-F	100	0,8	50	1,5	130	ND
Sólidos sedimentables 2h	ml/2h	2540-F	300	1	150	3	80	ND
DBO ₅	mg/L	5210-B	1800	70	800	66	550	38
DQO	mg/L	5220-D	9281	288	4438	164	3591	195
Fósforo total	mg/L	4500P-B/E	39,6	33,3	37,9	12,5	31	24,8
Nitrógeno amoniacal	mg/L	4500-F	212	206	220	205	196	246
Nitrógeno orgánico	mg/L	4500-Norg C	77,3	80,8	208	91,5	140	92,6
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	EPA 351-3	289	287	429	297	336	338

MS: muestras de slurry; MLF: muestras del líquido filtrado

La Tabla 3 muestra la reducción de concentración RC para cada parámetro en el respectivo evento de llenado, y su valor medio. El valor medio de RC obtenido para sólidos sedimentables en diez minutos y dos horas, DBO₅ y DQO, demuestra la alta efectividad de los GCs para disminuir la concentración de estos sólidos y la carga orgánica expresada como DBO y DQO en lodos originados en los tratamientos de efluentes en frigoríficos.

En el caso del fósforo total, en el evento 2 se obtuvo una importante reducción (67%), no obstante, el valor está por debajo de los valores de RC reportados por Mukhtar et al. (2007) y Cantrell et al. (2008), aunque debe señalarse, que estos estudios fueron realizados con lodos de tambos. En los eventos de llenado 1 y 3, el valor de RC es casi nulo y negativo, lo cual no debería llamar la atención debido a: a) la alta solubilidad del fósforo y lo que ello implica a la hora de intentar retener este nutriente a través del filtrado físico; b) el fósforo tiende a unirse a los sólidos finos, por lo tanto, si se hace una eficiente retención de sólidos se alcanzará una alta reducción en la concentración de fósforo, y como se verá más adelante la eficiencia de filtración EF, aunque siendo alta, está por debajo de los valores esperados para esta tecnología y esto podría explicar que el fósforo haya atravesado la torta de filtro y el geotextil junto con los sólidos que no fueron retenidos; c) si bien se está comparando la concentración de P-total en muestras MS y MLF para un mismo evento de llenado, no se debe perder de vista que al interior de los GCs este compuesto se encuentra altamente concentrado en el lodo, y el flujo de percolación puede arrastrar P-soluble que está disponible en el interior del tubo hacia su exterior, generando concentraciones de P-total en MLF mayores a las medidas en MS.

Para el N-amoniacal y NTK, se encontraron bajos o inclusive valores negativos de RC, esto podría explicarse porque el N-amoniacal es soluble y por su peso relativo en la concentración de NTK, que como ya se dijo, en la mayoría de las muestras de MS y MLF el N-amoniacal duplica la concentración de N-orgánico. No obstante, se destaca el valor de RC obtenido para N-orgánico y NTK en el evento de llenado 2, respectivamente 56% y 31%; nótese, que justamente en este evento la relación N-amoniacal/N-orgánico es de 1,05.

Tabla 3. Reducción de la concentración de nutrientes y sólidos sedimentables en cada evento de llenado

Parámetro	RC1 (%)	RC2 (%)	RC3 (%)	RC _{medio}
Sólidos sedimentables 10'	99	97	100	99
Sólidos sedimentables 2h	100	98	100	99
DBO ₅	96	92	93	94
DQO	97	96	95	96
Fósforo total	16	67	20	34
Nitrógeno amoniacal	3	7	-26	-5
Nitrógeno orgánico	-5	56	34	28
Nitrógeno total Kjeldahl	1	31	-1	10

RC: reducción de concentración

Aunque hay una importante variación en los valores de RC para P-total y el nitrógeno, se sugiere adoptar como referencia para futuros estudios los valores de RC obtenidos en el evento de llenado 2, entendiéndose que un sistema de deshidratación con GCs operado de forma tal que se consiga una reducción de ST mayor al 90% podría aumentar el RC para estos parámetros, principalmente para el P-total.

4.2 Eficiencia de deshidratación y filtración

En la Tabla 4 se presenta la concentración de sólidos medida en la MS y MLF, y la eficiencia de filtración EF para cada evento de llenado. Nótese, que la eficiencia promedio obtenida, del 75%, es un 20% inferior a la EF reportada por Mukhtar et al. (2007) y Worley et al. (2008), quienes reportaron una EF de 93,5% y 90% a 97%, respectivamente; y tan solo un 7% inferior a la EF reportada (80,6%) por Cantrell et al. (2008) para estudios a escala y realizados bajo condiciones controladas en laboratorio. En todo caso, se debe destacar el resultado obtenido en el evento de llenado 1, donde EF alcanza un valor de 79% en coincidencia con la más alta concentración de ST en MS. Finalmente, valga recordar que todas las referencias citadas trabajaron con lodos provenientes de lagunas primarias, donde debe esperarse que haya un mayor contenido de partículas sólidas granulares en comparación con las partículas sólidas granulares que pueden llegar hasta una laguna aireada antecedida por tres lagunas anaeróbicas.

Tabla 4. Concentración de sólidos totales y eficiencia de filtración (EF) en cada evento de llenado

Parámetro	Unidad	Standard Methods	MS1	MLF1	MS2	MLF2	MS3	MLF3	EF (%) medio
Sólidos Totales	mg/L	9223 A	5720	1220	3950	1200	4490	1050	
EF (%)				79		70		77	75

MS: muestras de slurry; MLF: muestras del líquido filtrado

La eficiencia de deshidratación ED se presenta en la Figura 4. Todos los valores de ED están referidos a $PS_{inicial}$ (concentración media de sólidos, en peso, medida en el lodo tal cual como se encuentra al interior de la laguna). El valor hallado para $PS_{inicial}$ fue 3,4%, lo cual implica un contenido de agua del 2841%. También, se presenta la evolución de la humedad (expresada como peso de agua sobre el peso total de la muestra humedad) y el porcentaje de sólidos PS para el lodo que se encuentra al interior de los GCs. Como es de esperar, ED aumenta con el tiempo, y es inversamente proporcional a la disminución de la humedad en el lodo contenido al interior del geocontenedor, y directamente proporcional al aumento en la concentración de sólidos. Lamentablemente, en la literatura disponible no se encuentran valores de referencias para ED con lodos iguales o similares a los estudiados en este trabajo, por lo tanto, no se puede realizar una comparación de resultados. No obstante, se debe mencionar que la concentración de sólidos alcanzada a los 20 días ($PS = 21\%$) está dentro del rango de valores típicos para biosólidos y lodos de agricultura según Lawson, 2008. Por otra parte, un lodo con humedad inferior al 70% es un lodo que ya está en condiciones de ser manipulado por equipos típicamente empleados para movimiento de suelos. Finalmente, es de gran importancia resaltar que a partir de los valores $PS_{inicial} = 3,4\%$ y $PS_{día_{124}} = 32\%$, se ha estimado una reducción del volumen de lodo de 92,5%.

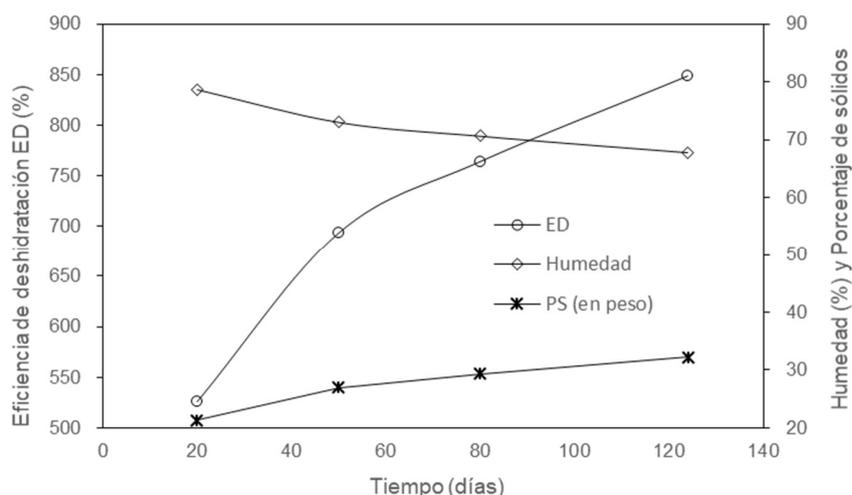


Figura 4. Eficiencia de deshidratación y humedad

5. CONCLUSIONES

No hay estudios de acceso público realizados con lodos de la misma naturaleza que los analizados en esta investigación, por lo tanto, esta investigación aporta datos originales sobre la eficiencia de los geocontenedores para reducir la concentración de sólidos y nutrientes en corrientes de lodo provenientes de los sistemas de tratamiento de efluentes líquidos producidos en frigoríficos vacunos.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten sugerir que los geocontenedores son una alternativa técnicamente viable para deshidratar lodos generados en el tratamiento de efluentes residuales producidos en frigoríficos/mataderos. Esta conclusión se limita a los lodos generados a través del tratamiento de efluentes residuales con el uso de lagunas de estabilización; en correspondencia con la naturaleza del lodo empleado en este estudio.

Para las condiciones en que se realizaron los trabajos de deshidratación de lodos objeto de análisis en esta investigación, se alcanzó una reducción en la concentración media de sólidos sedimentables en 10 minutos y 2 horas de 99%; en la concentración de DBO₅ y DQO la reducción media alcanzada fue de 94% y 96%, respectivamente; para el fosforo total la máxima reducción alcanzada en la concentración fue 67%; para el nitrógeno amoniacal, orgánico y total Kjeldahl, la máxima reducción alcanzada en la concentración fue 7%, 56% y 31%, respectivamente.

El líquido filtrado a través de los geocontenedores no cumplió los parámetros de calidad exigidos por la normativa local para su vertido directo en colectoras cloacales, conductos pluviales o cuerpo de agua superficial, por lo tanto, este líquido tuvo que ser redireccionado al sistema de tratamiento de efluentes. Para proyectos en los que se exija que el efluente filtrado cumpla con los límites establecidos para vuelco directo, se recomienda estudiar cuidadosamente cómo reducir la concentración de los nutrientes solubles en agua.

En esta investigación, los geocontenedores han demostrado tener una eficiencia media de filtración para el tratamiento de lodos de frigorífico de 75%. También, han demostrado ser eficientes para deshidratar este tipo de lodo, alcanzando una eficiencia de deshidratación de 850% transcurridos 124 días desde el último evento de llenado y partiendo desde una concentración inicial media de sólidos de 3,4%. Esta eficiencia de deshidratación se corresponde con una humedad del 68% y una concentración de sólidos en peso del 32% para el lodo contenido al interior de los geocontenedores en el día 124; pero más importante aún, representa una disminución del volumen de lodo de 92,5%.

6. REFERENCIAS

American Public Health Association (APHA) (2017), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23er ed., Washington, DC, USA.

Cantrell, K., Chastain, J., & Moore, K. (2008). Geotextile filtration performance for lagoon sludges and liquid animal manures dewatering, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(3): 1067-1076.

Comisión Nacional del Agua. (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, D.F., México.

Herrera, E. J., (2019). *Evaluación de la eficiencia de tubos de geotextil en el tratamiento de los efluentes producidos en un frigorífico. Caso de aplicación a escala real en la Provincia de Buenos Aires*, Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Koerner, R. (2012). *Designing with geosynthetics (Sexta ed., Vol. I)*, Xlibris Corporation, USA.

Lawson, C. R. (2008). Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering, *Geosynthetics International*, 15(6): 384-427

Masters, G., & Ela, W. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*, Pearson Educación S.A., Madrid, España.

Moo-Young, H. K, Tucker W. R. (2002a). Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes, *Geotextiles and Geomembranes*, 20: 191–212

Moo-Young, H. K, Gaffney, D. A., Mo, X. (2002). Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes, *Geotextiles and Geomembranes*, 20: 289–303

Mukhtar, S., Lazenby, L., & Rahman, S. (2007). Evaluation of a synthetic tube dewatering system for animal waste pollution control, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 23: 669-675.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). OCDE-FAO Perspectivas agrícolas 2018-2027. París. Francia.

U.S. Department of Agriculture (USDA) (2017). Conservation practice standard: waste separation facility, Natural Resources Conservation Service (NRCS), Code n°632. USA.

Worley, J., Bass, T., & Vendrell, P. (2004). Field test of geotextile tube for dewatering dairy lagoon sludge, *M. A. ASAE Paper No. 044078*. St. Joseph, Ed.

Worley, J., Bass, T., & Vendrell, P. (2008). Use of geotextile tubes with chemical amendments to dewater dairy lagoon solids, *Bioresource Technology*, 99: 4451–4459

SM2540G, Standard Methods for Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples, *American Public Health Association (APHA)*, Washington, DC, USA.

ASTM D2974, Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D2216, Standard Test Methods for Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.