

ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS DE PROCESOS DE HIGIENIZACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE SEWAGE SLUDGE DISINFECTION PROCESSES FROM MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT

M. CECILIA DIOCARETZ Y GLADYS VIDAL¹

Unidad de Ingeniería Ambiental. Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile.

¹Autor correspondencia: Dra. Gladys Vidal, fax (56-41)220407076, teléfono (56-41)2204067, e-mail: glvidal@udec.cl

RESUMEN

Los procesos de higienización de lodos permiten reducir o eliminar microorganismos patógenos. Luego de ser higienizados están aptos para ser utilizados como enmienda de suelos ácidos y/o erosionados, sin riesgos de contaminación. El objetivo de este trabajo es comparar los aspectos técnicos y económicos de los procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas, analizando los procesos indicados en el Artículo 7 del Reglamento D.S. 4/2009 y una tecnología renovable adicional. Se realizaron los diagramas de flujo con las operaciones unitarias involucradas en los procesos y, posteriormente, se cuantificaron las entradas y salidas mediante balances de masa y energía para una alimentación de 100 Ton de lodo. A su vez, se determinaron los costos de inversión a partir de la selección de equipamiento y maquinaria adecuada y los costos operación se estimaron en base a los consumos obtenidos en los balances. Finalmente, se calculó el Valor Actual de Costos (VAC) para comparar alternativas que reportan los mismos beneficios, pudiéndose demostrar que la higienización de lodos mediante procesos biológicos y de energías renovables son técnicamente factibles y más viables económicamente que otros procesos, destacando el bajo manejo de equipamiento y maquinaria y costos de operación relativamente bajos.

Palabras clave: Lodos sanitarios, proceso de higienización de lodos, balance de materia, balance de energía, costos.

ABSTRACT

The sewage sludge disinfection process can reduce or remove pathogens microorganisms. After disinfection, sludges are appropriate to be used as an amendment for acid and/or eroded soils, without contamination risk. The aim of this work is to compare the technical and economic aspects of sewage sludge from wastewater treatment disinfection processes, for analyzing the processes set out in Article 7 of Regulation D.S. 4/2009 and an additional renewable technology. For this study, flow charts with the unit operations involved in the processes and subsequently, quantified their inputs and outputs through the mass and energy balances for a supply of 100 Tons of sludge were made. Also, economic aspects like the investment costs from the selection of appropriate machinery/equipment and the operating costs were estimated. Finally, the Actual Costs Value (ACV) comparing alternatives that reports the same benefits was calculated. Sewage sludge disinfection through biological and renewable processes are technically feasible and economically more viable than other processes, because of the low handling machinery/equipment and relatively low operation costs.

Keywords: Municipal sewage sludge, sludge disinfection process, mass balance, energy balance, cost.

Recibido: 02.04.10. Revisado: 20.04.10. Aceptado: 15.05.10.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Consideraciones generales

En Chile la eliminación de la materia orgánica disuelta de las aguas servidas se realiza principalmente a través del tratamiento biológico de lodos activados (Barañaño y Tapia, 2004). Sin embargo, al estabilizar el efluente se producen lodos biológicos o secundarios a partir de la masa excedente del proceso. Estos lodos son sometidos a procesos de espesamiento, estabilización de la materia orgánica y deshidratación para facilitar su posterior manejo (Mahamud *et al.*, 1996). Estos lodos secundarios presentan una amplia biodiversidad de microorganismos patógenos, como bacterias, virus, protozoos y helmintos, pero en concentraciones mayores que en las aguas servidas ya que se redujo su contenido de agua (Cortez, 2003; Torres *et al.*, 2005).

Sin embargo, existen microorganismos capaces de sobrevivir a los tratamientos convencionales. La estabilización del lodo permite reducir considerablemente el contenido de patógenos (El-Motaium, 2006), pero aun así su aplicación directa al suelo sin un tratamiento adecuado representa un riesgo para la salud pública y el medio ambiente (Torres *et al.*, 2005). Es el caso del *Ascaris lumbricoides*, un helminto o parásito intestinal presente en las heces fecales humanas, que cuando se encuentra distribuido en suelos se considera contaminado y no apto para su desarrollo agrícola. Los huevos de *Ascaris* se encuentran en mayores concentraciones

que otros parásitos en los lodos, pueden alcanzar un promedio de 3.000 unidades por gramo de lodo seco y permanecer viables durante 6 años (McClatchey, 2002; Melmed and Comminos, 1979).

En la Figura 1 se muestra que su ciclo biológico comienza con el desarrollo de los huevos dispersos en el suelo, donde se vuelven infecciosos después de varias semanas, según las condiciones ambientales. Estos huevos son ingeridos y eclosionan en el intestino, luego las larvas penetran por vía venosa hasta los pulmones, desde donde ascienden a la garganta para ser ingeridos y volver al intestino delgado para convertirse en gusanos adultos (CDC, 1999; Montoya, 2008). Los huevos son altamente resistentes a agentes estresores, tales como el cloro, estrés físico, pH extremo y temperaturas moderadas, por lo cual ha sido utilizado para estudiar la efectividad de la higienización (Shamma y Al-Adawi, 2002).

Debido a lo descrito anteriormente, entró en vigencia el D.S. 4/2009 “Reglamento para el Manejo de Lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”, en cuyo Artículo 7 se describen una serie de procesos de higienización, con el propósito de destruir o inactivar los huevos de helmintos presentes en los lodos a un valor inferior a 1 unidad viable en 4 gramos de sólidos totales.

El objetivo del presente trabajo es comparar los aspectos técnicos y económicos de los procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas.

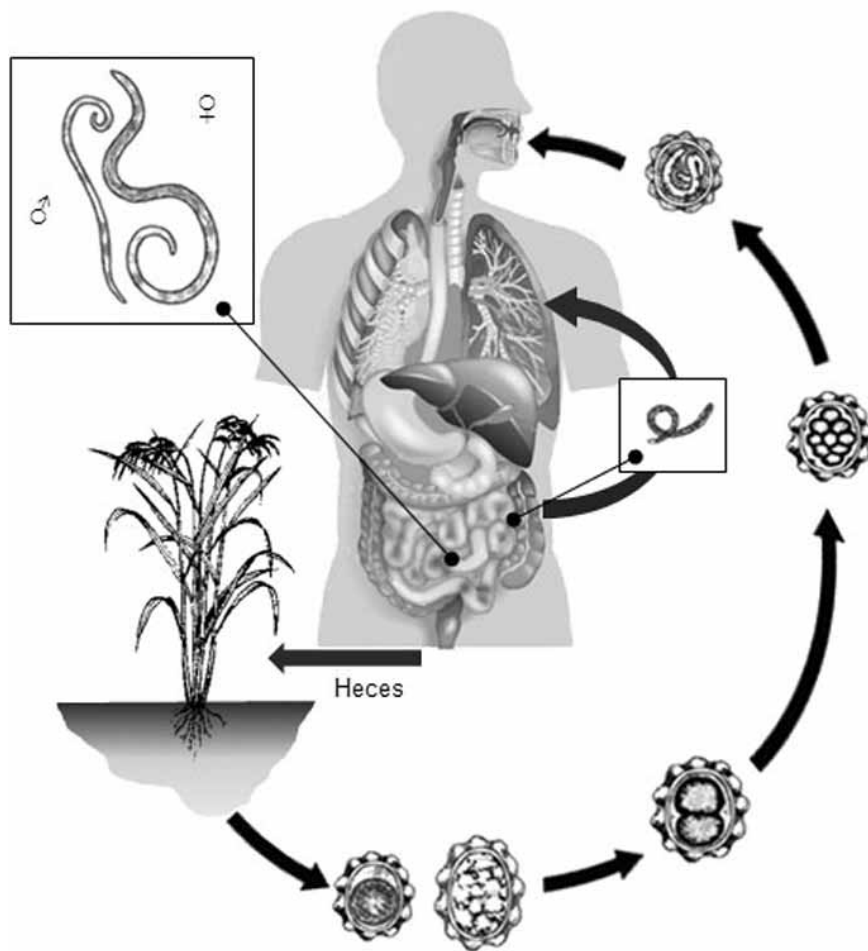


Figura 1. Ciclo de vida del parásito intestinal *Ascaris lumbricoides* (Adaptado de CDC, 1999).

1.2. Procesos de higienización de lodos

En la Tabla I se presentan los procesos de higienización indicados en el Artículo 7: Tratamiento alcalino, secado térmico, pasteurización, tratamiento con calor, irradiación con rayos gamma, irradiación con haces de electrones, digestión aeróbica termofílica y compostaje. Además, se incluye un proceso basado en energías renovables conocido como secado solar-biológico empleado con la misma finalidad.

El tratamiento alcalino (PTA) es un proceso químico que consiste en el acondicionamiento del lodo biológico con cal y su posterior secado al aire (CONAMA, 2009). La reacción entre la cal y el agua eleva el pH y reduce el contenido de patógenos (Cortez, 2003; Méndez *et al.*, 2002). Además, produce amoníaco que favorece la reducción de los huevos de helmintos viables (Méndez *et al.*, 2002).

En los procesos térmicos como secado térmico (PST), pasteurización (PPA) y tra-

tamiento con calor (PTC), el lodo es sometido a temperaturas elevadas para destruir o inhibir a los microorganismos patógenos (Cortez, 2003). En los procesos PPA, PST y PTC, el lodo alcanza 70, 80 y 180°C, respectivamente (CONAMA, 2009; Tim, 1993).

Los procesos físicos están basados en la radiación de los lodos, que favorece la formación de radicales libres con la finalidad de destruir o reducir considerablemente la cantidad de patógenos (ASCE, 1992; Schrader, 1996). Esto es posible a través de procesos de irradiación con rayos gamma desde una fuente radioactiva de Cobalto-60 (PIG) o haces de electrones provenientes de aceleradores de alto voltaje (PIE) (ASCE, 1992; CONAMA, 2009).

Los procesos biológicos como la digestión aeróbica termofílica (PDAT) y el compostaje (PCO) permiten aprovechar las temperaturas alcanzadas durante la degradación de la materia orgánica para destruir o inactivar patógenos (Girovich, 1996; Roberts, 2006). En el PCO el lodo es mezclado con materiales estructurantes y dispuesto en pilas aireadas mediante volteo mecánico (Turovskiy and Mathai, 2006).

Finalmente, el secado solar-biológico (PSSB) es un proceso basado en aprovechar dos formas de energía renovable para reducir el volumen de los lodos y el contenido de patógenos (Salihoglu *et al.*, 2006). Su operación es similar a la empleada en el PCO (Diocaretz, 2010).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Aspectos técnicos de procesos de higienización de lodos

Se estudiaron los aspectos técnicos asociados a la operación de los siguientes procesos de higienización de lodos sanitarios: PTA, PST, PPA, PTC, PIG, PIE, PDAT, PCO y PSSB. Se

identificaron las operaciones unitarias involucradas y se desarrollaron los diagramas de flujo de los procesos en estudio. Al mismo tiempo, se establecieron los requerimientos durante las etapas de implementación y operación de los procesos.

2.2. Aspectos económicos de procesos de higienización de lodos

Se realizaron balances de masa y energía para cuantificar las entradas (insumos, energía y electricidad) y salidas (productos y subproductos) de los diagramas de flujo desarrollados, considerando una base de cálculo de 100 Ton de lodos.

Luego, se estimaron los costos de inversión y operación. Los costos de inversión de calcularon a partir de la cantidad y precios de equipos y máquinas, reportados en catálogos y cotizaciones. Mientras que la determinación de los costos de operación consideró los consumos anuales y precios unitarios de cada entrada al proceso.

Finalmente, se calculó el índice económico VAC (Valor Actual de Costos), donde " C_i " son los costos anuales del periodo " i ", se consideraron una tasa de descuento o retorno " r " de 10% y un periodo de evaluación " n " de 10 años, a través de la siguiente expresión:

$$VAC = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

3. RESULTADOS

3.1. Aspectos técnicos de procesos de higienización de lodos

Se establecieron los aspectos técnicos durante la operación de los procesos de higienización de lodos, referidos principalmente a: tipo de

lodo alimentado, requerimiento de insumos y/o energía, generación de subproductos, entre otros. En la Tabla I se indican las ventajas y desventajas técnicas de los procesos. Mientras que en la Figura 2 se muestran las

etapas que experimenta el lodo crudo (sin tratar) en cada uno de los procesos, ya sea de deshidratación, estabilización o higienización, antes de ser aplicados en suelos.

Tabla I. Comparación de aspectos técnicos relacionados con la implementación y operación de procesos de higienización de lodos.

Agente higienizante	Sigla	Proceso	Ventajas	Desventajas
Químico	PTA	Tratamiento alcalino.	Su operación es relativamente sencilla. Genera gas amoníaco que favorece la higienización de los lodos.	Se alimentan lodos deshidratados. Requiere insumos. Se generan bolsas y polvo. Posible reactivación de patógenos.
Térmico	PST	Secado térmico.	Reduce considerablemente el volumen del lodo.	Se alimentan lodos deshidratados y requiere operación intensiva.
	PPA	Pasteurización.	Se alimenta lodo en estado líquido o espesado.	Requiere de operación intensiva. Posible generación de cenizas.
	PTC	Tratamiento con calor.	Se alimenta lodo en estado líquido o espesado. Se obtiene un producto de fácil deshidratación.	Posible generación de cenizas.
Físico	PIG	Irradiación con rayos gamma.	Tiene buen poder de higienización.	Se alimentan lodos deshidratados. Requiere insumos.
	PIE	Irradiación con haces electrones.	No genera subproductos.	Se alimentan lodos deshidratados. Requiere insumos.
Biológico	PDAT	Digestión aeróbica termofílica.	Se alimenta lodo en estado líquido o espesado. No requiere una fuente de calor externa. Tolerancia a cambios en condiciones ambientales. No genera subproductos.	Requiere insumos y control de condiciones de operación. Se generan espumas.
	PCO	Compostaje.	Los microorganismos presentes en el lodo permiten la higienización.	Se alimentan lodos deshidratados. Requiere un terreno extenso e insumos.
Renovable	PSSB	Secado solar biológico.	La energía solar y los microorganismos presentes en el lodo permiten la higienización.	Se alimentan lodos deshidratados. Requiere un terreno extenso e insumos. Su efectividad disminuye a bajas temperaturas.

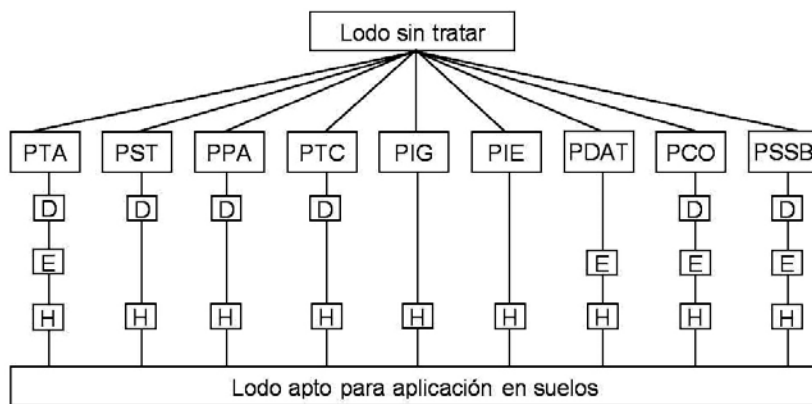


Figura 2. Procedimiento de tratamiento de lodos sanitarios para su aplicación en suelos (D: Deshidratación; E: Estabilización; H: Higieneización).

3.2. Aspectos económicos de procesos de higienización de lodos

En la Figura 3 se presentan el procedimiento que se lleva a cabo en el proceso de higienización y un balance de masa y energía del PSSB

donde se detallan los insumos requeridos y los consumos de electricidad y combustible. Se realizaron los mismos balances para los otros procesos de higienización, cuyos resultados se indican en la Tabla II.

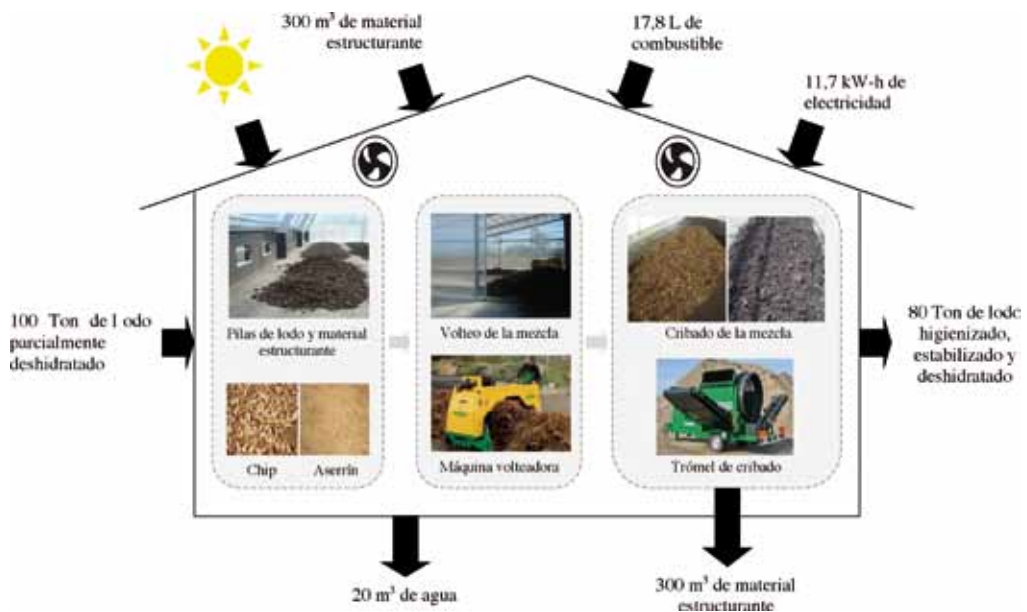


Figura 3. Balance de masa y energía del PSSB.

Tabla II. Balance de masa y energía para una alimentación de 100 Ton de lodo.

Proceso	Entradas			Salidas	
	Insumos	Combustible (L)	Electricidad (kW-h)	Producto (Ton)	Subproductos
PTA	10 Ton cal	NC	148,3	99,6	Bolsas de cal y material particulado
PST	NC	3.500	21.000	20	Cenizas
PPA	NC	250.000	500	INE	Cenizas
PTC	INE	INE	INE	INE	Cenizas
PIG	1.500 m ³ agua 31,3 kCi de Co ⁶⁰	NC	64.800	97,6	Lápices de Co ⁶⁰ sin actividad
PIE	156,1 m ³ agua	NC	510	97,6	NP
PDAT	3,8 Ton de O ₂ o 18,1 Ton de aire	NC	3.600	64	NP
PCO	300 m ³ material estructurante	26,9	NC	80	300 m ³ material estructurante
PSSB	300 m ³ material estructurante	34,2	11,7	80	300 m ³ material estructurante

NC: No consume; INE: Información no encontrada; NP: No produce.

En la Tabla III se muestran los niveles de costos estimados de inversión y operación de los procesos de higienización para el tratamiento de 100 Ton de lodos. Mientras que en la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos para el VAC de los procesos en los que se contó con información.

Tabla III. Variables económicas de procesos de higienización, sobre una base de cálculo de 100 Ton de lodos alimentados al proceso.

Proceso	Costos	
	Inversión	Operación
PTA	Medio	Bajo
PST	Medio	Bajo
PPA	INE	Alto
PTC	Medio	INE
PIG	Muy alto	Medio
PIE	Muy alto	Muy bajo
PDAT	INE	Muy bajo
PCO	Alto	Bajo
PSSB	Alto	Bajo

INE: Información no encontrada.
 Muy alto: US\$1.000.000 - más.
 Alto: US\$100.000 - 999.999.
 Medio: US\$10.000 - 99.999.
 Bajo: US\$1.000 - 9.999.
 Muy bajo: US\$0 - 999.

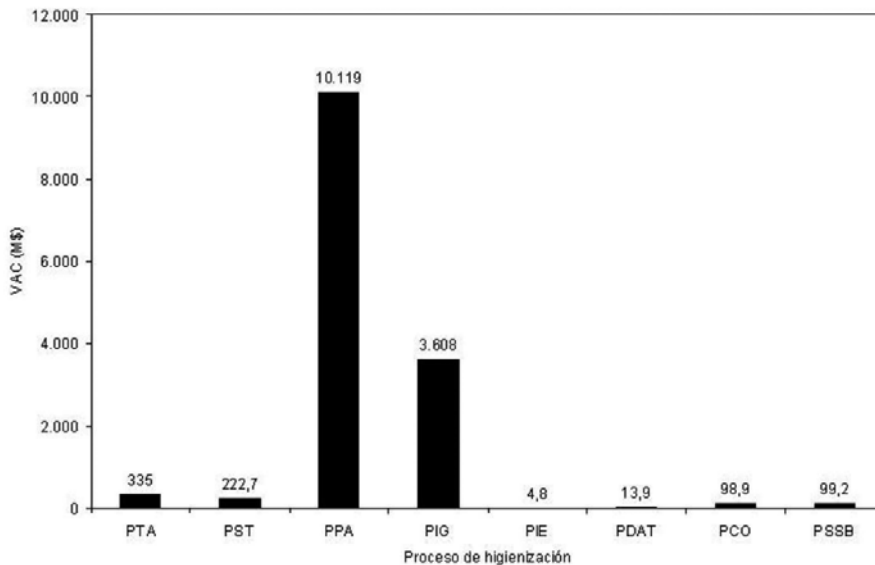


Figura 4. Valor Actual de Costos de procesos de higienización de lodos.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos, cabe destacar que, desde la perspectiva técnica, existen tres tecnologías en las cuales es posible alimentar lodos espesados o líquidos: PPA, PTC y PDAT. Mientras que los demás procesos operan con lodo deshidratado, por lo tanto existe un costo operacional asociado a la etapa de deshidratado previo de los lodos.

En vista de los antecedentes revisados, los insumos necesarios varían en función de la tecnología escogida. En casos como PST y PPA, no se requieren insumos pero en ellos existe mayor necesidad de energía externa para operar. Sin embargo, al comparar las variables energéticas estudiadas, parece ser que el mayor consumo de electricidad está determinado por el PIG (64.800 kW-h/100 Ton de lodos alimentados). Lo contrario ocurre en el PSSB, puesto que consume 11,7 kW-h/100 Ton de lodo alimentado.

Al considerar la masa del producto obtenido, existe mayor reducción del volumen del lodo en aquellos procesos donde existe la incorporación de calor, tales como PST, PDAT, PCO y PSSB. Mientras que en base a los subproductos obtenidos, en todos los procesos se proyecta la generación de vapor de agua. En el caso del PTA, también se prevé la generación de envases, material particulado y olores, estos últimos también se generarían en los procesos térmicos (PST, PPA y PTC). Además, resultaría interesante considerar las emisiones de gases de efecto invernadero para proyectar la huella ecológica asociada a cada proceso a futuro.

Además de la etapa de higienización, en la mayoría de los casos (PTA, PST, PTC, PDAT, PCO y PSSB) el proceso permite la estabilización y/o deshidratación del lodo. Esto debido a que el proceso considera una etapa adicional, tal como en el PTA, o la incorporación o presencia de agentes (calor y microorganismos) que permiten que ésta se lleve a cabo.

Al momento de comparar las variables económicas (costos de inversión y operación) de los diferentes procesos, en las tecnologías PIG y PIE se reportaron los mayores costos de inversión, superando los US\$1.000.000. Mientras que en PTA, PST y PTC, los costos obtenidos fueron menores, alcanzando un rango de US\$10.000 - 99.999. De acuerdo a los costos de operación, el mayor valor se obtuvo en el PIG, entre un rango de US\$10.000 - 99.999. Sin embargo, los valores fueron menores para PIE y PDAT (inferiores a US\$999), destacándose también las tecnologías PTA, PST, PCO y PSSB (US\$1.000 - 9.999). Mientras que el VAC, reporta la misma tendencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se entregan los siguientes comentarios finales y conclusiones:

- La higienización de lodos biológicos provenientes del tratamiento de aguas servidas a través de procesos biológicos y basados en energías renovables resulta técnicamente factible y más viable económicamente que otros procesos, debido al bajo manejo de equipamiento y costos de operación relativamente bajos.
 - Los procesos PPA, PTC y PDAT no requieren la deshidratación previa de los lodos para su operación.
 - De los balances de masa desarrollados, resulta importante el análisis de los insumos necesarios para los procesos de higienización y su disponibilidad. Se debe evaluar el volumen del material estructurante a emplear en PCO y PSSB, lo mismo para las fuentes radioactivas en PIG, ya que pueden tener efectos significativos en los costos de operación del proceso.
 - A futuro, se recomienda hacer un análisis económico para una alimentación mayor a 100 Ton de lodos que permita percibir los efectos de economía de escala y así, tomar la mejor decisión.
- Sin embargo, al momento de seleccionar una tecnología se debe considerar la cantidad de lodo a tratar, características del lodo a higienizar, clima bajo el cual se operará, características del suelo en el cual se aplicará el lodo higienizado, entre otros.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa sanitaria ESSBIO S.A. por su colaboración en este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ASCE (1992), Radiation Energy Treatment of Water, Wastewater and Sludge: A State-of-the-Art Report by the Task Committee on Radiation Energy Treatment. New York, pp 49.
- BARAÑAO P, TAPIA, L (2004), Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile. *Ciencia & Trabajo* 6(13): 111-117.
- CDC (1999). Laboratory Identification of Parasites of Public Health Concern. Centers for Disease Control & Prevention. National Center for Zoonotic, Vector-Borne and Enteric Diseases. Division of Parasitic Diseases.
- CONAMA (2009), DS N° 4: Reglamento para el manejo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, pp 18.
- CORTEZ E (2003), Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la Región Metropolitana. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, pp 184.
- DIOCARETZ, M (2010), Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas. Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental, Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, pp 119.

- EL-MOTAUM R (2000), Alleviation of Environmental Pollution Using Nuclear Techniques Recycling of Sewage Water and Sludge in Agriculture: a Case Study. *ICEHM*: 323-332.
- GIROVICH M (1996), Biosolids treatment and management processes for beneficial use. CRC Press, pp 440.
- MAHAMUD M, GUTIÉRREZ A, SASTRE H (1996), Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*, 3(2): 47-62.
- MCCLATCHEY K (2002), Clinical Laboratory Medicine, 2nd Edition, Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, pp 1963.
- MELMED L, COMNINOS D (1979), Disinfection of sewage sludge with gamma radiation. *Water SA* 5(4): 153-159.
- MÉNDEZ J, JIMÉNEZ B, SALGADO G (2002), Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México, p. 8.
- MONTOYA H (2008), Microbiología básica para el área de la salud y afines. 2ª ed. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, pp 282.
- ROBERTS E (2006), Water quality control handbook. McGraw-Hill, pp 1008.
- SALIHOGU N, PINARLI V, SALIHOGU G (2007), Solar drying in sludge management in Turkey. *Renewable Energy* 32: 1661-1675.
- SCHRADER R, CASTILLO G, RAFFO A, RUBIO T (1996), Desinfección de lodos de aguas servidas mediante radiaciones ionizantes. *AIDIS Consolidación para el desarrollo*, México, 1-7.
- SHAMMA M, AL-ADAWI M (2002), The morphological changes of *Ascaris lumbricoides* ova in sewage sludge water treated by gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry* 65: 277-279.
- TIM R (1993), The practical handbook of compost engineering. CRC Press, pp 717.
- TORRES P, MARMOLEJO L, BOTINA A (2005), Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal. *Agronomía Colombiana* 23(2): 310-316.
- TUROVSKIY I, MATHAI P (2006), Wastewater sludge processing. Wiley-Interscience, pp 354.