

Evaluación técnica, financiera y ambiental de la higienización alcalina del lodo de aguas residuales ordinarias para su transformación en biosólido

Technical, financial, and environmental evaluation of the alkaline sanitization of sewage sludge for its transformation into biosolid

Erick Centeno Mora¹, Ronald Calderón Mejía²

[Recibido: 12 de febrero 2024, Aceptado: 17 de julio 2024, Corregido: 30 de julio 2024, Publicado: 20 de septiembre 2024]

Resumen

[Introducción]: La búsqueda de técnicas y modelos de gestión del lodo generado durante el tratamiento de las aguas residuales es necesaria para garantizar un saneamiento sostenible a mediano plazo en América Latina. Una vía interesante consiste en convertir el lodo en un biosólido aprovechable en la agricultura por medio de la higienización alcalina. **[Objetivo]:** Se evaluó la eficacia y la viabilidad económica y ambiental de esta técnica para la obtención de un biosólido tipo A aprovechable en la agricultura a partir de lodo de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ordinaria. **[Metodología]:** Para ello se probó experimentalmente en escala de laboratorio la eficacia en el decaimiento de parámetros microbiológicos higienizados con cal viva, usando lodo anaeróbico y aeróbico de PTAR. Los resultados experimentales alimentaron un modelo de análisis de beneficio/costo y de ciclo de vida. **[Resultados]:** Pudo corroborarse que la aplicación de dosis de cal de 40 % permitió obtener un biosólido tipo A con concentraciones de microorganismos patógenos no detectables, lo cual se mantuvo en esa condición por más de 30 días. Además, el análisis de beneficio/costo y de ciclo de vida permitieron concluir que esta opción sería más atractiva que la disposición del lodo en un relleno sanitario, debido al ahorro correspondiente en compuestos químicos (fertilizantes o cal agrícola) derivado de su aprovechamiento. **[Conclusiones]:** Por lo tanto, la técnica de higienización alcalina puede considerarse como adecuada para la gestión del lodo de PTAR y su aplicación a mayor escala debe investigarse en mayor detalle en el país y la región latinoamericana, considerando también el riesgo de presencia de metales pesados en este subproducto.

Palabras clave: Biosólido; economía circular; encalado; fango de depuradora; saneamiento.

Abstract

[Introduction]: The search for techniques and methods for managing sludge generated during wastewater treatment is necessary to ensure sustainable sanitation in the medium term in Latin America. An interesting approach involves converting sludge into a biosolid usable in agriculture through alkaline sanitization. **[Objective]:** We evaluated this technique's efficacy and economic and environmental viability for obtaining an agriculturally usable type A biosolid from municipal wastewater treatment plant (WWTP) sludge. **[Methodology]:** To this end, the efficacy in reducing microbiological parameters was experimentally tested at the laboratory scale using

- 1 Docente e investigador, Escuela de Ingeniería Civil y Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. erick.centenomora@ucr.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0001-8806-0355>
- 2 Graduado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. ronald.calderon@ucr.ac.cr; <https://orcid.org/0009-0002-3177-7405>



quicklime, for anaerobic and aerobic WWTP sludge. The experimental results fed a benefit/cost analysis model and a life cycle assessment. [Results]: It was confirmed that applying a 40 % lime dose allowed the obtention of a type A biosolid with non-detectable concentrations of pathogenic microorganisms, which remained in that condition for more than 30 days. Additionally, the benefit/cost and life cycle analyses concluded that this option would be more attractive than sludge disposal in a landfill, due to the corresponding savings in chemical compounds (fertilizers, agricultural lime). [Conclusions]: Therefore, alkaline sanitization can be considered suitable for WWTP sludge management. Its application on a larger scale should be further investigated in the country and the Latin-American region, considering the risk associated to the presence of heavy metals too.

Keywords: Biosolid; circular economy; liming; sanitation; wastewater sludge.

1. Introducción

El aumento en la cobertura en el servicio de saneamiento es uno de los principales desafíos para los países en desarrollo (Bijekar *et al.*, 2022) y, de forma particular, para los países latinoamericanos (Bressani-Ribeiro *et al.*, 2019; Datshkovsky *et al.*, 2022). Uno de los problemas asociados con el aumento de la cobertura del saneamiento es la gestión de los subproductos generados durante el proceso de tratamiento del agua residual, en especial los lodos o fase sólida (WEF, 2018). En el caso de Costa Rica, investigaciones previas han mostrado las carencias que existen en términos de cobertura de saneamiento y de gestión sostenible de estos lodos (Centeno Mora *et al.*, 2024; Centeno Mora y Murillo Marín, 2019). Es claro que conforme se aumente la cobertura de tratamiento de aguas residuales en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Costa Rica y en el resto de la región latinoamericana, mayor será la generación de lodos de las PTAR que deban tratarse y disponerse. Por este motivo, la búsqueda de opciones de gestión sostenible de los lodos es indispensable para no limitar el aumento en la cobertura del saneamiento en la región.

Diversos modelos de gestión del lodo de PTAR ordinaria han sido aplicados en todo el mundo (Andreoli *et al.*, 2014; Ciešlik *et al.*, 2015). Uno de los más comunes consiste en enviar el lodo a un relleno sanitario, por considerarlo un residuo. Otra posibilidad más sostenible es la de catalogarlo como un subproducto que puede ser aprovechado, valorizando la materia orgánica, nutrientes (N, P, K) y el contenido energético que posee (Ding *et al.*, 2021; Pradel *et al.*, 2016). Esto permitiría cerrar ciclos de nutrientes en las comunidades, al aplicar principios de economía circular en el sector del saneamiento (Soares *et al.*, 2019).

El aprovechamiento del lodo podría aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios, además de reducir el consumo de fertilizantes químicos, debido a la posibilidad de sustituir parte de los nutrientes de fuentes químicas o no renovables (urea, roca fosfórica u otros) en las actividades agrícolas (Yoshida *et al.*, 2013). Sin embargo, para garantizar la viabilidad de esta aplicación, es necesario que el lodo biológico sea tratado para cumplir con diversos estándares relacionados con su textura (debe ser un sólido, reduciendo su humedad), composición química (pH, contenido de metales pesados y otras sustancias) y, en especial, su carga de microorganismos indicadores de contaminación fecal (Andreoli *et al.*, 2014). Al cumplir con estos estándares,



usualmente por medio de un tratamiento, es posible transformar el lodo en un biosólido aprovechable en la agricultura de forma segura para los agricultores, el suelo y los productos agrícolas producidos. En Costa Rica, la reglamentación nacional (DE-39316-S, 2015) exige un contenido de sólidos mínimo de 25 % (humedad máxima de 75 %), un pH entre 5 y 12, una cantidad de coliformes fecales inferior a 2 000 UFC/g y un máximo de 1 huevecillo de helminto/g viable si se desea conseguir un biosólido ordinario tipo A, apto para ser dispuestos en un suelo donde pueda haber contacto directo con el público (es decir, sin restricción de uso como enmienda de suelos).

Para los lodos de PTAR ordinaria, una vez que se garantiza que el lodo tiene un contenido aceptable de metales pesados según la reglamentación local, por lo general será necesario un proceso de higienización con el fin de reducir la carga de microorganismos. Diversas técnicas de higienización pueden ser aplicadas al lodo de PTAR (Andreoli *et al.*, 2014; Metcalf y Eddy, 2014): compostaje, higienización alcalina, higienización térmica, pasteurización, entre otras. En la higienización alcalina se aplica una base fuerte (por ejemplo, cal viva), para subir el pH hasta un valor aproximado de 12 durante un período de varias horas a días, con lo cual los microorganismos son inactivados, principalmente debido a la desnaturalización del protoplasma celular de los microorganismos y a la generación de amoníaco gaseoso (NH_3), el cual posee un elevado poder bactericida (Andreoli *et al.*, 2021).

La higienización alcalina es una técnica ampliamente usada en otros países, pero con una aplicación poco documentada en Costa Rica. En algunas investigaciones previas en el país (Sánchez Castillo, 2021), no fue posible obtener un biosólido tipo A por medio de la higienización alcalina (cal viva) sola, ni combinada con secado solar (no se alcanzó el límite de 2000 UFC/g con las dosis de cal reportadas, de hasta 20 %). Por otro lado, Masís-Meléndez *et al.* (2021), con una dosis de cal viva de solo 10 % observó la eliminación completa de coliformes fecales (también denominados como coliformes termotolerantes, en la reglamentación de Costa Rica todavía se usa el término de coliformes fecales) de una muestra tan solo 1 h después de su aplicación, aunque no hubo un seguimiento en el tiempo para verificar que no hubiera un recrecimiento de estos microorganismos (Andreoli *et al.*, 2021). En ese sentido, no está claro si la técnica de higienización alcalina con lodo de PTAR podría garantizar su transformación en un biosólido tipo A, de modo a permitir su aprovechamiento sin restricciones, y manteniendo esta condición por un período más extendido.

Por otro lado, todavía se mantiene algunas dudas sobre la sostenibilidad económica y ambiental de esta práctica (Tarpani y Azapagic, 2023; Sugurbekova *et al.*, 2023; Sugurbekova *et al.*, 2023). En particular, no está claro en qué medida la comercialización del biosólido generado por medio de la higienización alcalina podría compensar los costos del proceso (materia prima, energía, mano de obra, entre otros), o cuáles serían las ventajas ambientales de su aplicación, considerando que el biosólido puede sustituir una parte de los fertilizantes químicos utilizados en la agricultura, a pesar de que la cal viva es un recurso no renovable (Hadas *et al.*, 2021). Para abordar estas cuestiones, se torna necesario efectuar un análisis integral del ciclo de producción y aprovechamiento del subproducto. Herramientas como el análisis de costos y el análisis del



ciclo de vida han demostrado ser muy útiles para este fin en estudios previos de sostenibilidad en la gestión de subproductos del tratamiento de aguas residuales (Corominas *et al.*, 2020; Ding *et al.*, 2021; Pradel *et al.*, 2016).

En ese sentido, el objetivo de este artículo es evaluar la higienización alcalina del lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales ordinarias en escala de laboratorio, con el fin de convertir este subproducto en un biosólido tipo A que pueda usarse como mejorador de suelos sin restricciones sanitarias. Para ello, se comparó la efectividad del proceso en lodo biológico de origen anaerobio y aerobio, además de que se analizó el beneficio económico y ambiental de sustituir un fertilizante químico por un biosólido tipo A higienizado con cal, por medio de un análisis de costos y de ciclo de vida.

2. Metodología

2.1 Caracterización del lodo y la cal

El Cuadro 1 presenta las características fisicoquímicas más importantes de las muestras de lodo utilizadas en este trabajo. Se evaluó el efecto de la higienización en un lodo anaeróbico y en un lodo aeróbico.

Cuadro 1. Caracterización del lodo de PTAR utilizado para los experimentos de higienización alcalina.
Table 1. Characterization of WWTP sludge used for the alkaline sanitation experiments.

Parámetro	Muestra	
	Lodo anaeróbico	Lodo aeróbico
Potencial de hidrógeno, pH (-)	6.6	6.0
Conductividad eléctrica (mS/cm)	4.4	5.1
Carbono, C (%)	37.4	34.6
Nitrógeno, N (%)	3.9	5.6
Relación C/N (-)	9.5	6.2
Fósforo, P (%)	0.50	1.0
Potasio, K (%)	0.12	0.2
Calcio, Ca (%)	3.1	1.2
Magnesio, Mg (%)	0.30	0.27
Azufre, S (%)	1.6	0.90
Hierro, Fe (mg/kg)	12 514	15 678
Cobre, Cu (mg/kg)	288	130
Zinc, Zn (mg/kg)	2 222	761
Manganeso, Mn (mg/kg)	69	157
Boro, B (mg/kg)	13	12



Parámetro	Muestra	
	Lodo anaeróbico	Lodo aeróbico
Potencial de hidrógeno, pH (-)	6.6	6.0
Coliformes fecales (UFC/g)	2.5·10 ³	4.4·10 ⁵
Huevecillos de helmintos (U/g)	142	No detectable
Salmonella (presencia/ausencia)	Positiva	Positiva

Los análisis de caracterización (**Cuadro 1**) fueron realizados en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Después de secar la muestra a 80 °C y pasarla a través de una criba de 1.0 mm, los análisis se realizaron en duplicado; se muestra el valor promedio. Los parámetros de P, Ca, Mg, K, S, Fe, Zn, Mn y B fueron determinados por medio de muestras de 0.5 g que fueron digeridas con ácido nítrico concentrado y analizadas por medio de espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Los valores de carbono y nitrógeno se establecieron en un auto analizador por combustión seca según el principio de combustión seca de Dumas, con muestras de 80-100 mg. Los parámetros microbiológicos fueron analizados de acuerdo con los procedimientos de [AWWA \(2012\)](#).

Ambos lodos eran de tipo biológico y provenían de sistemas de tratamiento de aguas residuales ordinarias. El lodo anaeróbico pertenecía a un reactor de tipo UASB (por sus siglas en inglés para *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) de un condominio con un caudal promedio de aproximadamente 250 m³/d (producción aproximada de lodo deshidratado de 4.3 m³/mes), mientras que el aeróbico era de un sistema de lodo activado de aireación extendida de un residencial, con un caudal promedio de aproximadamente 130 m³/d (producción aproximada de lodo deshidratado de 2.7 m³/mes). Ambos sistemas de tratamiento se ubican en Santa Ana, San José Costa Rica, y son operadas por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). En ambos casos (aeróbico y anaeróbico), el lodo se tomó de forma directa de los lechos de secado (tamaño de aproximadamente 18 m² y 15 m², respectivamente), después de un período de 10-12 días de deshidratación. Se tomaron muestras de lodo de 5 puntos distintos de un lecho que se homogeneizaron para preparar una muestra representativa del lecho. Cuando el lodo se muestreó, el contenido de sólidos totales (ST) era de 23.6 % y 81.6 % para el lodo anaeróbico y aeróbico, respectivamente, con relaciones de sólidos volátiles/sólidos totales (SV/ST) de 0.33 % y 0.50 %, respectivamente. Las condiciones de humedad fueron adaptadas durante el experimento para alcanzar un valor óptimo de 75 %, según se detalla en la Sección 2.2.

Con respecto a la cal utilizada, se consideró cal viva (CaO) comercialmente disponible en el medio para actividades de construcción. Se utilizó un saco de 15 kg comercializado para construcción, de la marca Piedras y Lajas S. A., con una pureza de CaO ≥ 90 % y un costo aproximado de USD 4.2.



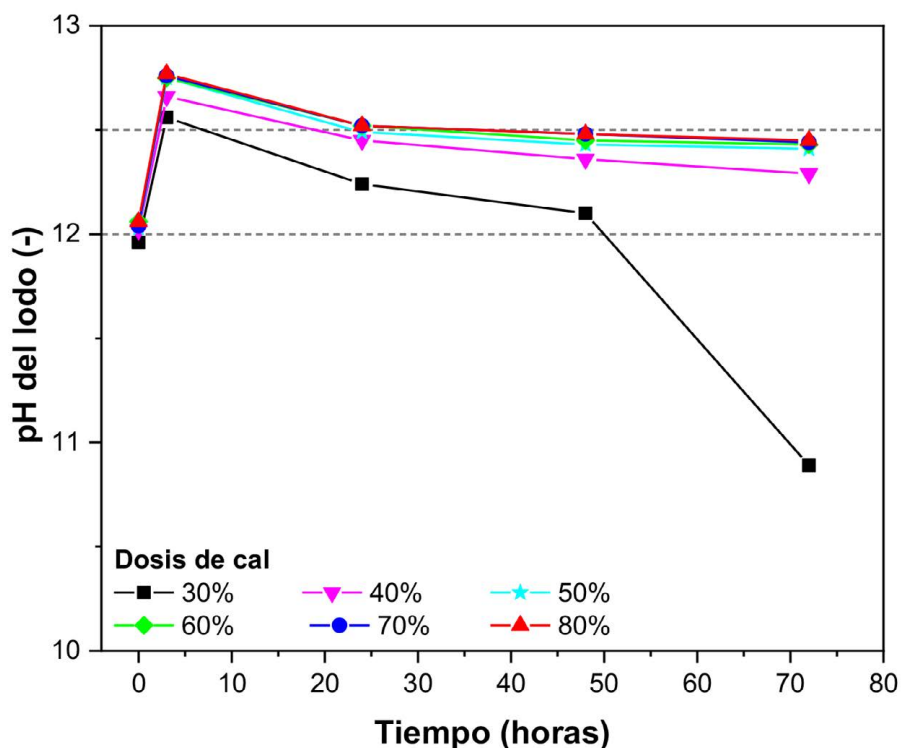
2.2 Diseño del experimento de higienización alcalina

Las dosis de cal a aplicar para alcanzar estos pH se determinaron experimentalmente por medio de una prueba de dosificación antes de realizar el experimento de higienización. Esto se hizo con el objetivo de conocer mejor la respuesta de las muestras al tipo de cal específico usado en el experimento. Se seleccionaron los valores de pH de 12.0 y 12.5 por ser el primero el mínimo teórico recomendado para una higienización completa del lodo de PTAR (Bittencourt *et al.*, 2021), considerando también un valor superior (12.5) como margen de seguridad para garantizar el mantenimiento de un pH igual o superior a 12.0 durante todo el período del experimento (30 días). Las dosis de cal se expresan en masa de cal por masa de lodo seco.

La **Figura 1** muestra la variación del pH en la muestra de lodo, para las distintas dosis probadas. Cabe destacar que la muestra de lodo (aeróbico en este caso) tenía un pH, temperatura y humedad de 8.23, 21.9 °C y 75.7 %, respectivamente, antes de la adición de las distintas dosis de cal.

Figura 1. Curva de dosificación de cal para alcanzar el pH de referencia (lodo aeróbico).

Figure 1. Lime dosage curve to reach the reference pH (aerobic sludge).



Según se observa en la **Figura 1**, y con el fin de lograr un pH superior a 12 en el largo plazo, era necesaria una dosis igual o superior al 40 % de cal (masa de cal/masa seca de lodo). De este modo, para el experimento de higienización alcalina se determinó una dosis de cal de 40 % y 84



% para lograr un pH de 12.0 y 12.5 después de 3 días de reacción, respectivamente. Estos valores resultaron congruentes con la literatura especializada (Andreoli *et al.*, 2014). En ese sentido, los resultados se analizaron en función de la dosis de cal aplicada, siendo 40 % y 84 % los valores considerados para los experimentos (variables independientes).

El experimento de higienización alcalina se realizó siguiendo el esquema experimental presentado en la **Figura 2**.

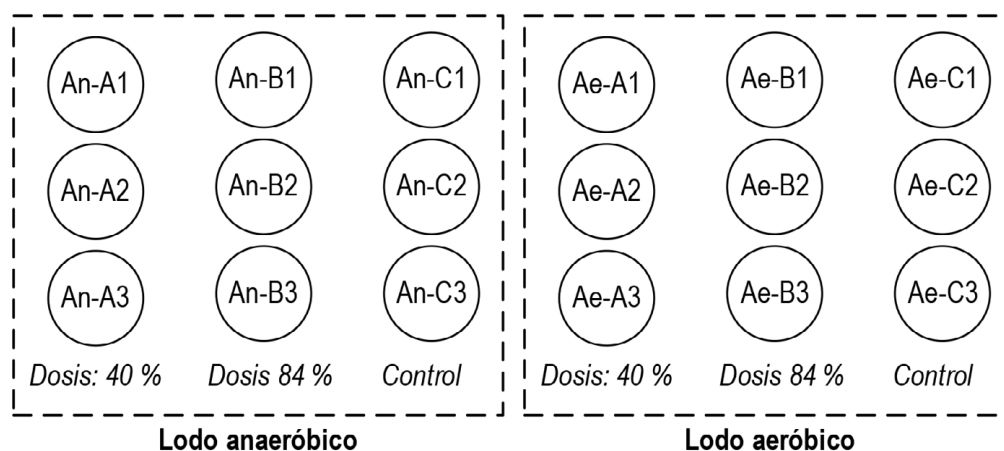


Figura 2. Esquema del diseño de experimento de higienización alcalina.
Figure 2. Scheme of the alkaline sanitation experiment design.

Según se observa en la **Figura 2**, el experimento se realizó para dos muestras de lodo: anaeróbico y aeróbico (ver sus características en el **Cuadro 1**). Cada uno fue evaluado bajo tres condiciones: (i) control, una muestra para la cual no se aplicó cal y se realizó el seguimiento de los parámetros de control en el tiempo del experimento; (ii) muestra con dosis de cal de 40 % (masa de cal viva/masa de lodo seco); y (iii) muestra con dosis de 84 %.

El tiempo del experimento se fijó en 30 días, lo cual corresponde a una estabilización alcalina prolongada (EAP), según las recomendaciones de Andreoli *et al.* (2021), para lograr un biosólido de mayor calidad. Se dio seguimiento a varios parámetros de calidad del lodo durante los 30 días del experimento. Las muestras fueron dosificadas con cal en el día 0, se verificó que la humedad inicial de cada muestra fuera cercana al 75 %, según las recomendaciones de la literatura (Andreoli *et al.*, 2014) para lograr las mejores condiciones de actividad de la cal.

El pH y la temperatura de cada muestra fueron medidos de forma independiente para cada una de las tres réplicas, mientras que para los otros parámetros se realizaron muestras compuestas, mezclando las tres réplicas y realizando un único ensayo, según se detalla en el **Cuadro 2**.



Cuadro 2. Análisis de laboratorio realizados durante el experimento.
Table 2. Laboratory analyses performed during the experiment.

Parámetro	Unidades	Tipo de muestreo	Días de muestreo	Método analítico
pH	-	Simple	0, 1, 2, 7, 14 y 30	Sonda marca Extech Instruments
Temperatura	°C	Simple	0, 1, 2, 7, 14 y 30	Termómetro
Humedad, sólidos totales y sólidos volátiles	%	Compuesto	0 y 30	AWWA (2012) 2540G
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Compuesto	0, 7, 14 y 30	Extracción y AWWA (2012) 4500-NH3
Nitrato	mg/L	Compuesto	0, 7, 14 y 30	Extracción y HACH 8039
Coliformes fecales	UFC/g	Compuesto	0*, 7, 14, 21 y 30	AWWA (2012) 9222G
Huevecillos de helmintos	Unidades/g	Compuesto	0 y 30	USEPA (2017)
Salmonella	Unidades/g	Compuesto	0 y 30	AWWA (2012) 9274

* Medido antes de aplicar la cal y 3 horas después de aplicar la cal.

Los experimentos y los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de ingeniería ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil (Universidad de Costa Rica), mientras que los análisis microbiológicos se llevaron a cabo en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Para la extracción del nitrógeno amoniacal y nitrato en las muestras de lodo se consideró una solución de 2.0 M de KCl. Utilizando una muestra de 5.0 g de lodo, se dejó agitando la solución (50 mL) durante 1 hora y en reposo por 24 horas. Luego se analizó la solución extraída por medio de métodos espectrofotométricos, según se indicado en el **Cuadro 2**.

2.3 Consideraciones para el análisis de beneficio/costo y ambiental

Tanto el análisis financiero como el ambiental se realizó por medio de un estudio del ciclo de vida considerando como unidad funcional una tonelada de lodo húmedo con 75 % de humedad, con las características presentadas en el **Cuadro 1**, para el lodo anaeróbico y el aeróbico (ACV para ambos lodos, con fines comparativos).

La **Figura 3** muestra los escenarios comparados para el análisis de beneficio/costo (B/C) y el análisis del ciclo de vida ambiental (ACV). En el caso del análisis B/C solo se consideraron los escenarios E2, E3 y E4, mientras que para el ACV ambiental, los cuatro.

Con respecto al análisis de B/C, se tomaron en cuenta los siguientes elementos: suministro de cal viva (CaO), electricidad requerida para mezclar el lodo y la cal en una batidora de concreto durante 10 minutos, mano de obra compuesta por un operador tipo peón, y costo del transporte del producto por 50 km a la zona de aprovechamiento. Para estimar el beneficio económico, se consideró el costo del fertilizante nitrogenado (urea) y del fósforo (roca fosfórica)



en el mercado local, tomando en cuenta el contenido de nitrógeno y fósforo equivalentes que tendría el biosólido y sustituirían esos nutrientes de origen químico. En uno de los escenarios simulados (E4) se consideró que el alto pH del biosólido podría reducir la cal agrícola (cal apagada o cal hidratada, que se produce cuando la cal viva CaO reacciona con la humedad del lodo y se convierte en $\text{Ca}(\text{OH})_2$), la cual sería usada para estabilizar un suelo ácido, con un porcentaje de ahorro de 75 % por tonelada de lodo húmedo. El **Cuadro 3** muestra los valores considerados para el análisis de B/C.

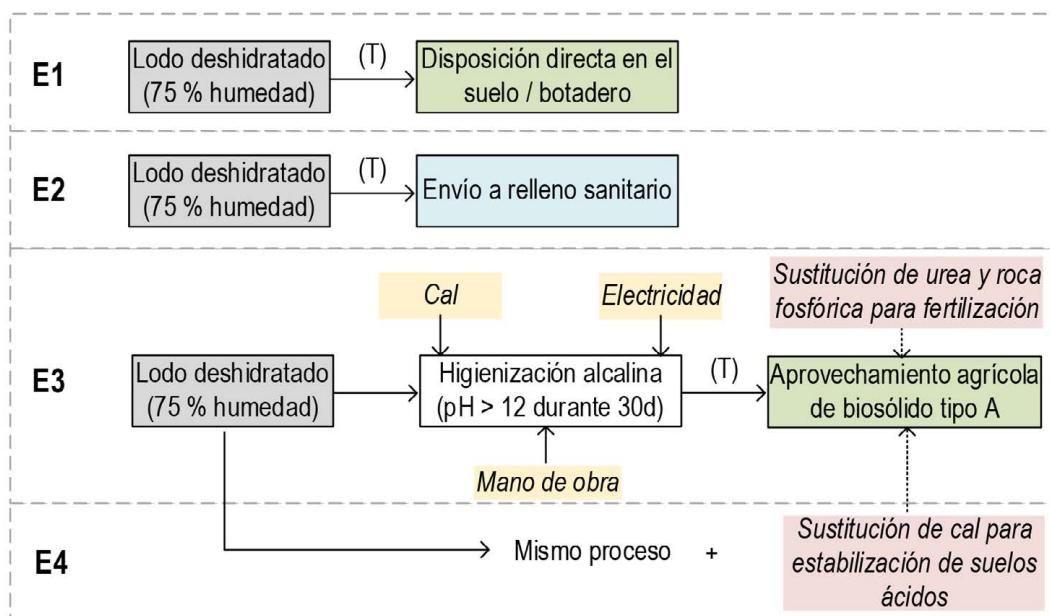


Figura 3. Escenarios de gestión del lodo comparados para los análisis de beneficio/costo y de ciclo de vida: E1–disposición directa del lodo en el suelo/botadero no autorizado; E2–transporte y envío al relleno sanitario; E3–higienización alcalina con cal viva y aprovechamiento como biosólido tipo A; E4–aprovechamiento como biosólido tipo A y ahorro de cal agrícola para estabilización de suelos ácidos.

Figure 3. Sludge management scenarios compared for benefit/cost and lifecycle analyses: E1–direct disposal of sludge on soil/unauthorized dump; E2–transport and sending to landfill; E3–alkaline sanitation with quicklime and use as Class A biosolid; E4–use as Class A biosolid and savings of agricultural lime for stabilization of acidic soils.



Cuadro 3. Valores considerados para el análisis financiero de beneficio/costo (unidad funcional de una tonelada de lodo con humedad de 75 %).

Table 3. Values considered for the financial benefit/cost analysis (functional unit of one ton of sludge with 75 % moisture).

Parámetro	Valor considerado	Unidad	Observaciones	Referencia
Costo de la cal viva (CaO)	0.28	\$/kg	-	EPA (2023)
Consumo energético de la batidora	2.5	kWh/ton	Considera un motor de 850W en una batidora de 200 L, funcionando 8 ciclos por día de 20 min cada uno.	Arbitrario
Costo del kWh	0.20	\$/kWh	Tarifa promedio para industrias.	ARESEP (2024)
Horas de trabajo de peón	2.5	h/ton	Considerando un rendimiento similar al de la elaboración de concreto en obra con batidora.	Madrigal (2009)
Mano de obra (peón)	4.2	\$/h	Considerando salario por hora de USD 3.0 y cargas de 40 %.	MTSS (2023)
Costo del transporte	20	\$/ton	Consulta a empresa de residuos. Se consideró una distancia de 50 km.	Arbitrario
Costo del fertilizante nitrogenado	2.04	\$/kgN	Costo equivalente de urea con concentración de 46 %.	MAG (2023)
Costo del fertilizante fosfórico (P ₂ O ₅)	0.85	\$/kgP	Costo de roca fosfórica.	MAG (2023)
Costo de cal agrícola (Ca(OH) ₂)	0.26	\$/kg	Costo comercial para cal apagada, tipo dolomita.	CoopeAgri (2024)

Los costos se expresaron en dólares estadounidenses. En el escenario E2 también se consideró aparte el costo evitado por el envío de la tonelada de lodo a un relleno sanitario, tomando en cuenta una distancia de transporte de 50 km y un costo de disposición de 38 USD/ton (según consulta a empresa de residuos, considerando el alquiler de un contenedor, la colecta y el transporte por esta distancia, y la disposición en un relleno sanitario habilitado).

Con respecto al análisis de ciclo de vida ambiental, se consideraron los escenarios E1, E2, E3 y E4 de la **Figura 3**, para el lodo anaeróbico y aeróbico. Para realizar el ACV se utilizó el software SIMAPRO (PRé Sustainability, 2024) versión 9.4.0.2. La base de datos considerada para la conformación del inventario fue Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2024). En el caso de los escenarios E1 y E2, se estableció el transporte de 1.0 ton de lodo húmedo (75 % de humedad) y la disposición en un relleno no sanitario con elevada infiltración (500 mm) y en un relleno sanitario bien operado, respectivamente. En ambos casos los parámetros del modelo original fueron convenientemente modificados para no incluir algunos contaminantes que no se consideraron para los otros escenarios (metales pesados, por ejemplo), con el fin de facilitar una comparación más homogénea entre los escenarios. Para todos los escenarios se tomaron en cuenta las condiciones de Costa Rica cuando estaban disponibles en la base de datos (por ejemplo, la matriz eléctrica), o globales.



Para los escenarios E3 y E4 se consideró el transporte del lodo (1 tonelada húmeda + la cal), la emisión de amoníaco y consumo de electricidad durante la higienización, y la emisión de contaminantes al agua, aire y suelo en la aplicación agrícola del biosólido. Para estimar estas emisiones se siguió el modelo propuesto en Nemecek y Schnetzer (2011), según las recomendaciones de Amaral *et al.* (2018). A partir de las características químicas del biosólido (**Cuadro 1**) este modelo estima las emisiones al aire de NH₃, N₂O, NO_x; al agua subterránea de NO₃, PO₄; y al agua superficial de PO₄. Para calcular la partición entre la fase líquida y sólida de los metales se consideraron los datos de lixiviación reportados en Hernández *et al.* (2001), para Fe, Cu, Zn y Mn.

En el caso de la evaluación de los impactos ambientales se consideró el modelo Recipe 2016 (Huijbregts *et al.*, 2017), de tipo *endpoint* con una perspectiva jerárquica, debido a su amplio uso en estudios de ACV con PTAR y acatando las recomendaciones de la literatura en la materia (Corominas *et al.*, 2020). Este modelo permite calcular un total de 22 impactos a partir de los datos del inventario. Estos impactos se agrupan s en tres grandes compartimientos de daño: salud humana, ecosistemas y recursos. El detalle se observa en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Impactos considerados en el ACV–Modelo Recipe *endpoint*.
Table 4. Impacts considered in the LCA–ReCiPe *endpoint* model.

Compartimiento de daño	Unidad de resultado	Impactos
Salud humana	DALY (<i>disability adjusted life years</i>). Representa los años perdidos o años con una discapacidad que una persona padece debido a un accidente o enfermedad.	Calentamiento global, salud humana. Agotamiento del ozono estratosférico. Radiación ionizante. Formación de ozono, salud humana. Formación de materia particulada fina. Toxicidad humana carcinogénica. Toxicidad humana no carcinogénica. Consumo de agua, salud humana.
Ecosistema	Especies-año (potencial de especies perdidas cada año en ecosistemas terrestres y marinos).	Calentamiento global, ecosistemas terrestres. Calentamiento global, ecosistemas de agua dulce. Formación de ozono, ecosistemas terrestres. Acidificación terrestre. Eutroficación de agua dulce. Eutroficación marina. Ecotoxicidad terrestre. Ecotoxicidad de agua dulce. Ecotoxicidad marina. Uso de suelo. Consumo de agua, ecosistemas terrestres. Consumo de agua, ecosistemas acuáticos.
Recursos	USD 2013 (costos adicionales, referenciados al dólar del 2013, necesarios para extraer estos materiales en el futuro).	Escasez de recursos minerales. Escases de recursos fósiles.

Fuente: Huijbregts *et al.* (2017).



El modelo permite integrar impactos específicos (*midpoint*) en indicadores más generales que pueden ser adicionados para una interpretación más global en función del compartimiento que es dañado por cada subactividad. Todos los impactos fueron calculados de forma independiente, aunque en este trabajo se muestran solo los que representaron al menos 1 % del impacto total del compartimiento evaluado. También se estimaron los impactos normalizados para poder comparar los daños entre los distintos compartimientos, utilizando los factores de normalización propios de Recipe 2016 (National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands, 2020).

3. Resultados

3.1 Efectividad de la técnica de higienización alcalina para transformar el lodo en biosólido tipo A

El Cuadro 5 muestra los resultados de los parámetros microbiológicos para ambas muestras, en el tiempo. La Figura 4 presenta el comportamiento de los parámetros de pH, temperatura, contenido de nitrógeno amoniacal y de nitrato para las muestras de lodo anaeróbico y aeróbico.

Cuadro 5. Evolución en el tiempo de los coliformes fecales o termo tolerantes de las muestras de lodo (dosis en masa de cal por masa seca de lodo).

Table 5. Evolution over time of fecal or thermotolerant coliforms in sludge samples (Lime dose in mass per dry mass of sludge).

Día	Lodo anaeróbico			Lodo aeróbico		
	Control	Dosis 40 % de cal	Dosis 84 % de cal	Control	Dosis 40 % de cal	Dosis 84 % de cal
0 (antes de encalado)	2.5·10 ³	2.5·10 ³	2.5·10 ³	4.4·10 ⁵	4.4·10 ⁵	4.4·10 ⁵
0 (3 h después de encalado)	2.0·10 ³	< 10	< 10	4.7·10 ⁵	< 10	< 10
7	1.8·10 ⁶	< 10	< 10	3.5·10 ⁵	< 10	< 10
14	7.9·10 ⁵	< 10	< 10	4.3·10 ⁵	< 10	< 10
21	3.5·10 ⁵	< 10	< 10	4.2·10 ⁵	< 10	< 10
30	1.0·10 ⁴	< 10	< 10	2.7·10 ⁵	< 10	< 10

En el caso del lodo aeróbico, las muestras dieron negativo en huevecillos de helmintos y en salmonella desde el día cero (antes del proceso de encalado), por lo que este análisis no se repitió para las muestras posteriores. En el caso de la muestra de lodo anaeróbico, la cantidad de huevecillos de helmintos fue de 142 en el día 0, y bajó a no detectable en las tres muestras (control, dosis de cal de 40 % para alcanzar un pH de 12.0 y dosis de cal de 84 % para llegar a un pH de 12.5), para el día 30. En el caso de la Salmonella, las muestras antes de la aplicación de la cal



eran positivas, mientras que a los 30 días las muestras de dosis de cal de 40 % y de 84 % fueron negativas, y la de control resultó positiva.

Los resultados microbiológicos de los análisis arrojaron resultados muy positivos para ambos tipos de lodo biológico, cumpliendo en ambos casos los límites de la reglamentación vigente (DE-39316-S, 2015) desde el día 0 (después de 3 h de aplicación de la cal), para la dosis de cal de 40 % y de 84 %. Esta condición se mantuvo durante los 30 días del experimento, lo cual permite verificar que no hay un recrecimiento de los microorganismos patógenos durante este período. El hecho de que el resultado haya sido similar para ambas dosis de cal sugiere que una dosis de 40 % es suficiente para obtener los resultados requeridos para la producción de un biosólido tipo A en Costa Rica.

Con respecto a la **Figura 4**, es posible observar que ambos lodos presentaron un comportamiento similar para las distintas variables analizadas. Por ejemplo, en el caso del pH (**Figura 4a1** y **a2**), este pudo mantenerse por encima de 12 unidades a lo largo de los 30 días, para ambas dosis de cal (40 % y 84 %), muy superior al control que varió entre 7 y 8 en ambos lodos. Llama la atención que ambas dosis presentaron un comportamiento equivalente, la dosis más elevada no tuvo un pH significativamente mayor a lo largo del tiempo, lo cual confirma que con una dosis de 40 % sería suficiente para lograr el biosólido tipo A. Con respecto a la temperatura (**Figura 4b1** y **b2**), no se presentó una diferencia apreciable entre las muestras encaladas y los controles (a diferencia del pH), manteniéndose cercana a la temperatura ambiente del laboratorio.

En relación con el contenido de N amoniacal (**Figura 4c1** y **c2**), ambos lodos presentaron una pérdida aproximada de 80 % debido a la adición de la cal, con un resultado ligeramente más marcado para la dosis de cal más alta. Con respecto al nitrato (**Figura 4d1** y **d2**), también se observa una concentración menor a la de la muestra control, de casi un 20 % para la dosis de 40 % en el lodo anaeróbico y de hasta 40 % para la dosis de cal de 84 % en el lodo aeróbico.

En síntesis, puede afirmarse que ambos lodos, a pesar de su diferencia de origen, presentaron un comportamiento muy similar al ser higienizados con un proceso alcalino equivalente, y que la dosis de cal de 40 % (la menor dosis experimentada) es preferible porque presentó resultados casi idénticos a los de la dosis mayor, pero con una cantidad de material de reacción (cal viva) menor.

3.2 Análisis de costo/beneficio de la aplicación de la técnica de higienización alcalina

La **Figura 5** muestra el resultado de los costos asociados al proceso de higienización alcalina para el aprovechamiento del biosólido producido en la agricultura, en sustitución de fertilizantes nitrogenados; según las condiciones explicadas en el **Cuadro 3** y la **Figura 3**. Se consideró un escenario en el que el lodo se envía a un relleno sanitario (E2), otro en el que se aplica el proceso de alcalinización para usar el biosólido en la agricultura, con lo cual se ahorra en fertilizantes químicos (E3) y también cal agrícola (E4). La unidad funcional considerada fue una tonelada de lodo húmedo (tonLH), con un porcentaje de sólidos de 75 %.



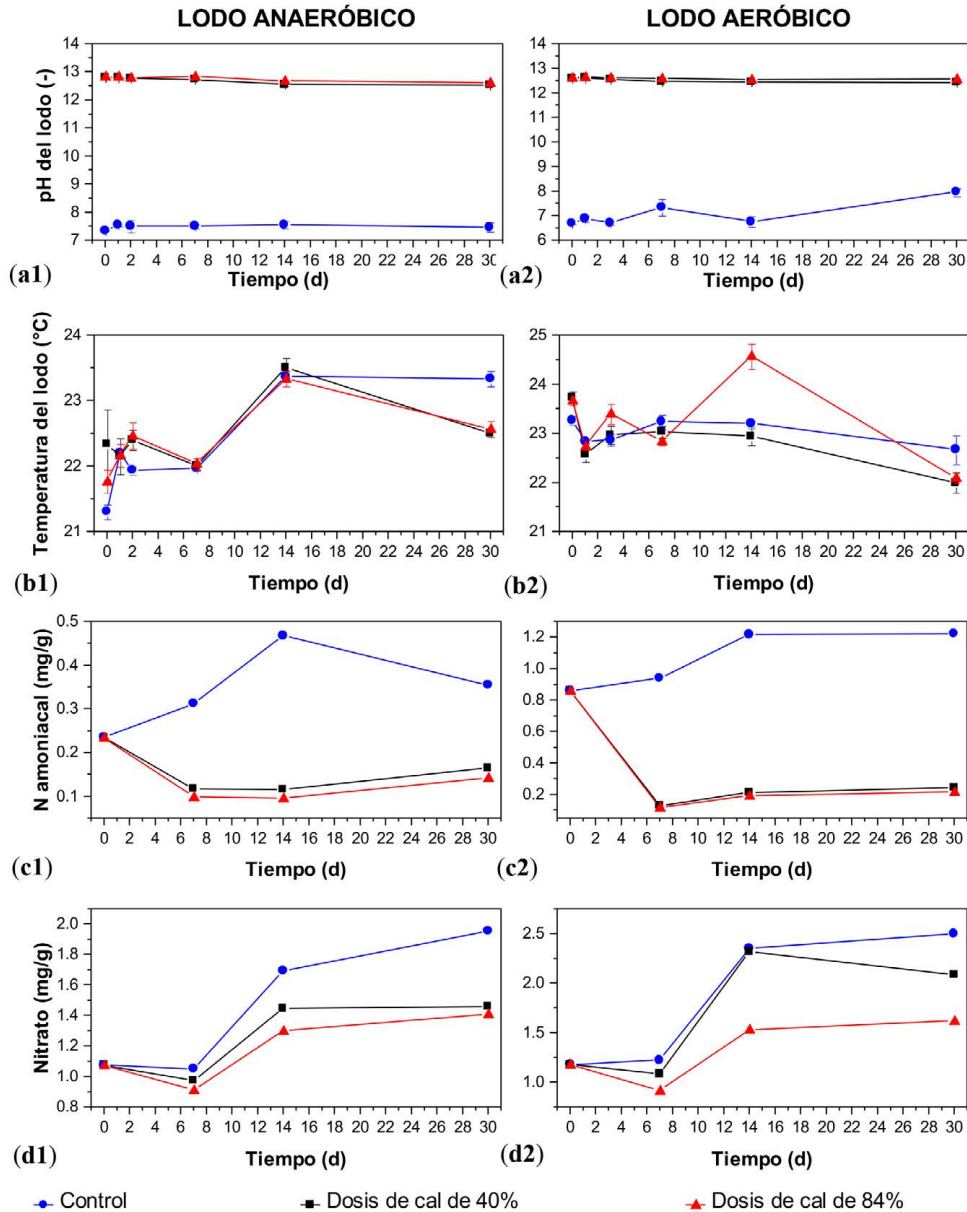


Figura 4. Evolución en el tiempo de distintos parámetros fisicoquímicos en las muestras de lodo (1) anaeróbico y (2) aeróbico. a. pH; b. temperatura; c. nitrógeno amoniacal y d. nitrato.

Figure 4. Evolution over time of various physicochemical parameters in sludge samples (1) anaerobic and (2) aerobic. a. pH; b. temperature; c. ammoniacal nitrogen; and d. nitrate.



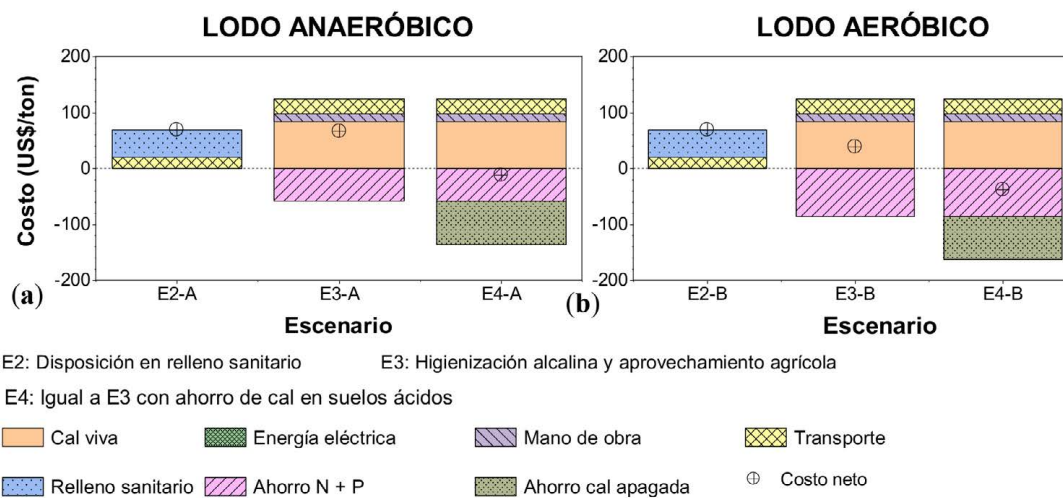


Figura 5. Análisis de costo/beneficio para el proceso de higienización alcalina: (a) lodo anaeróbico; (b) lodo aeróbico.

Figure 5. Cost/benefit analysis for the alkaline sanitation process: (a) anaerobic sludge; (b) aerobic sludge.

Según se observa en la **Figura 5**, para el lodo anaeróbico (a), el costo de la disposición en el relleno sanitario (E2-A) sería de aproximadamente USD 69.4/tonLH, mientras que el costo de implementación del proceso de higienización alcalina y comercialización sin valorización de la cal (E3-A) tendría un costo neto de aproximadamente USD 66.2/tonLH, un 4.6 % menor. Si además se considera el ahorro de cal agrícola (apagada) para un suelo ácido (E4-A), el costo neto del lodo pasaría a ser negativo, con un valor de casi -USD 11.0/tonLH. Para este lodo, los ahorros de nutrientes (E3) y de cal (E4) compensan los sobrecostos generados por el proceso de higienización, haciendo que dicha opción sea más atractiva que la disposición en el relleno sanitario.

En el caso del lodo aeróbico (**Figura 5b**), los costos netos son de USD 69.4, USD 39.1 y -USD 38.1/tonLH para la disposición del lodo en el relleno sanitario (E2-B), la higienización alcalina y la comercialización del biosólido tipo A (E3-B) y el ahorro adicional de cal para suelos ácidos (E4-C), respectivamente. En este caso, el ingreso por nutrientes es mayor al del lodo anaeróbico (USD 85.2 contra USD 58.1/tonLH, correspondientemente), lo cual hace que su aprovechamiento genere aún más beneficios que para el lodo anaeróbico. Esta diferencia se debe al contenido de nitrógeno y fósforo mayor para el lodo aeróbico (**Cuadro 1**). El aprovechamiento agrícola del lodo sin ahorro de cal (E3-B) sería hasta un 43 % más económico que la disposición en relleno sanitario (E2-B).

Por otro lado, los costos de energía eléctrica y mano de obra no tendrían un mayor impacto, considerando que representan menos de 1 % y menos de 14 % del costo total de higienización, respectivamente). Del mismo modo, el valor de fósforo economizado representa un valor marginal, de entre 5 % y 7 % del valor total de ahorro de los nutrientes.



Por lo tanto, el modelo de costo/beneficio sugiere que la conversión de lodo (tanto anaeróbico como aeróbico) en biosólido por higienización alcalina (escenarios E-3) sería más económica que su disposición en un relleno sanitario (escenarios E-2), con una compensación de costos completa si se ahorra cal en las labores agrícolas para suelos ácidos (Escenarios E-4).

3.3 Análisis de ciclo de vida ambiental de la aplicación de la técnica de higienización alcalina

El Cuadro 6 presenta los flujos de materia y energía (inventario) definidos para las simulaciones comparativas de ACV de los escenarios modelados (Figura 3). En el caso de E1 y E2, se consideró un transporte de 50 t-km y la disposición de una tonelada de lodo (75 % de humedad) en un relleno sanitario y en condiciones no sanitarias (botadero), respectivamente.

Cuadro 6. Inventario para los escenarios de aprovechamiento del lodo modelados.

Table 6. Inventory for the modeled sludge utilization scenarios.

Proceso	Detalle	Unidades	Escenario			
			E3-A	E4-A	E3-B	E4-B
<i>Higienización</i>	<i>Entradas</i>					
	Cal viva CaO	ton	0.30	0.30	0.30	0.30
	Electricidad	KWh	3.25	3.25	3.25	3.25
	<i>Salidas</i>					
	NH ₃	ton	0.002	0.002	0.003	0.003
<i>Disposición en el suelo (uso agrícola)</i>	<i>Entradas</i>					
	Transporte	t-km	50	50	50	50
	<i>Salidas</i>					
	Aire-NH ₃	ton	5.56·10 ⁻³	5.56·10 ⁻³	7.98·10 ⁻³	7.98·10 ⁻³
	Aire-N ₂ O	ton	3.66·10 ⁻⁴	3.66·10 ⁻⁴	5.25·10 ⁻⁴	5.25·10 ⁻⁴
	Aire-NOx	ton	7.68·10 ⁻⁵	7.68·10 ⁻⁵	1.10·10 ⁻⁴	1.10·10 ⁻⁴
	Agua sub- NO ₃	ton	8.99·10 ⁻³	8.99·10 ⁻³	8.91·10 ⁻³	8.91·10 ⁻³
	Agua sub-Fe	ton	2.63·10 ⁻⁴	2.63·10 ⁻⁴	5.25·10 ⁻⁴	5.25·10 ⁻⁴
	Agua sub-Zn	ton	4.32·10 ⁻⁷	4.32·10 ⁻⁷	1.95·10 ⁻⁷	1.95·10 ⁻⁷
	Agua sub - Mn	ton	1.67·10 ⁻⁶	1.67·10 ⁻⁶	5.71·10 ⁻⁷	5.71·10 ⁻⁷
	Agua sup - PO ₄	ton	1.58·10 ⁻⁴	1.58·10 ⁻⁴	2.63·10 ⁻⁴	2.63·10 ⁻⁴
	Suelo-Fe	ton	9.39·10 ⁻³	9.39·10 ⁻³	1.18·10 ⁻²	1.18·10 ⁻²
	Suelo-Cu	ton	2.16·10 ⁻⁴	2.16·10 ⁻⁴	9.73·10 ⁻⁵	9.73·10 ⁻⁵
	Suelo-Zn	ton	1.66·10 ⁻³	1.66·10 ⁻³	5.70·10 ⁻⁴	5.70·10 ⁻⁴
	Suelo-Mn	ton	5.16·10 ⁻⁵	5.16·10 ⁻⁵	1.17·10 ⁻⁴	1.17·10 ⁻⁴
	<i>Productos evitados</i>					
	Urea	ton	0.0577	0.0577	0.0829	0.0829
P ₂ O ₅	ton	0.0172	0.0172	0.0344	0.0344	
Cal agrícola	ton	-	-	0.30	0.30	

La E1: disposición en el relleno sanitario; E2: disposición en suelo o botadero; E3-A: uso agrícola del lodo anaeróbico; E4-A: escenario 3-A + acondicionamiento del pH en suelos ácidos; E3-A: uso agrícola del lodo aeróbico; E4-B: escenario E3-B + acondicionamiento del pH en suelos ácidos.

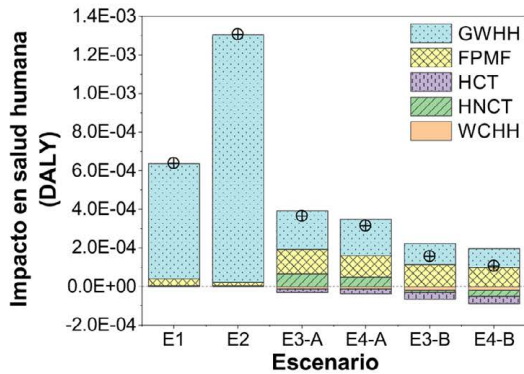


Figura 6 muestra los resultados obtenidos para el ACV realizado en este estudio, a partir de los resultados experimentales reportados anteriormente, para cada uno de los escenarios simulados. De los 22 impactos calculados por el modelo Recipe 2016 (Huijbregts *et al.*, 2017) se incluyen solo los que presentaron un valor porcentual mayor a 1 % del impacto total.

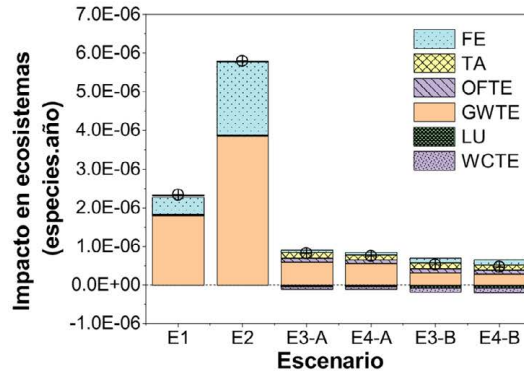
La **Figura 6** muestra que E2 resulta ser el peor escenario por los impactos en la salud humana (**Figura 6a**) y en los ecosistemas (**Figura 6b**), seguido por E1. Esto se debe principalmente al efecto del cambio climático (GWHH y GWTE, respectivamente). En el caso del impacto sobre los recursos (**Figura 6c**), la superioridad de los escenarios de aprovechamiento agrícola es evidente, de forma particular para E3-B y E4-B (lodo aeróbico), considerando la economía en combustibles fósiles. Los nutrientes adicionales en el lodo aeróbico parecen hacer una diferencia más importante que el aporte de la cal agrícola en el caso de E4-A. Al considerar los impactos normalizados de cada escenario (**Figura 6d**), es posible confirmar que los impactos más significativos de todos los escenarios se darían en el ámbito de la salud humana, y los escenarios de aprovechamiento del biosólido tendrían los menores impactos de forma general. Los escenarios de aprovechamiento agrícola del biosólido (E3 a E4) presentan impactos en la salud humana y en ecosistemas similares, con valores un poco inferiores para E3-B y E4-B, en el caso de la huella sobre la salud humana. En estos contextos los efectos de la actividad sobre el cambio climático y la emisión de partículas finas e tienen mayor impacto sobre la salud humana y los ecosistemas.

La **Figura 7** muestra el desglose de los impactos para cada actividad que compone los escenarios 4-A y 4-B de aprovechamiento agrícola del biosólido con ahorro de cal para el lodo anaeróbico y aeróbico, respectivamente.

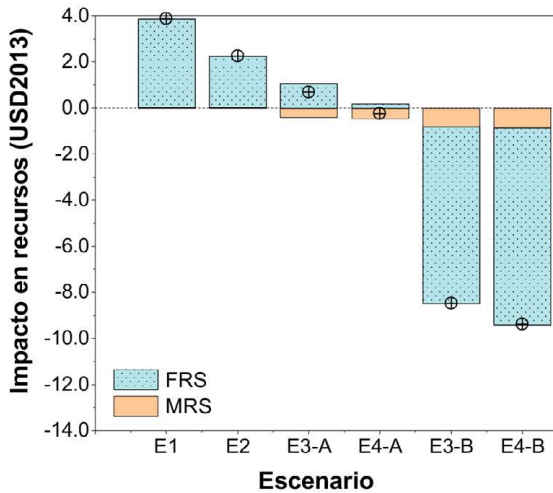




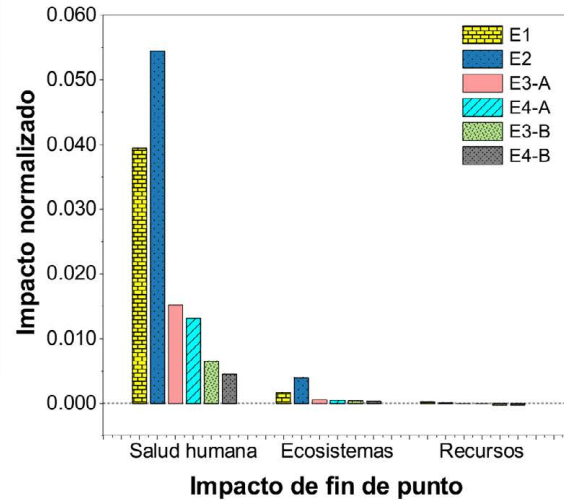
GWHH: Calentamiento global - salud humana ⊕ Valor neto
 FPMF: Formación de material particulado fino
 HCT: Toxicidad humana carcinogénica
 HNCT: Toxicidad humana no carcinogénica
 WCHH: Consumo de agua - salud humana



FE: Eutroficación en agua dulce ⊕ Valor neto
 TA: Acidificación terrestre
 OFTE: Formación de ozono, ecosistemas terrestres
 GWTE: Calentamiento global, ecosistemas terrestres
 LU: Uso del suelo
 WCTE: Consumo de agua - ecosistemas terrestres



MRS: Escasez de recursos minerales ⊕ Valor neto
 FRS: Escases de recursos fósiles



E1: disposición en el relleno sanitario; E2: disposición en suelo o botadero; E3-A: uso agrícola del lodo anaeróbico; E4-A: escenario 3-A + acondicionamiento del pH en suelos ácidos; E3-A: uso agrícola del lodo aeróbico; E4-B: escenario E3-B + acondicionamiento del pH en suelos ácidos.

Figura 6. Análisis de ciclo de vida para el proceso de higienización alcalina y disposición del lodo o biosólido: (a) impactos en la salud humana; (b) impactos en los ecosistemas; (c) impactos en los recursos; y (d) impacto normalizado de cada escenario.

Figure 6. Lifecycle analysis for the alkaline sanitation process and disposal of sludge or biosolid: (a) Impacts on human health; (b) Impacts on ecosystems; (c) Impacts on resources; and (d) Normalized impact of each scenario.



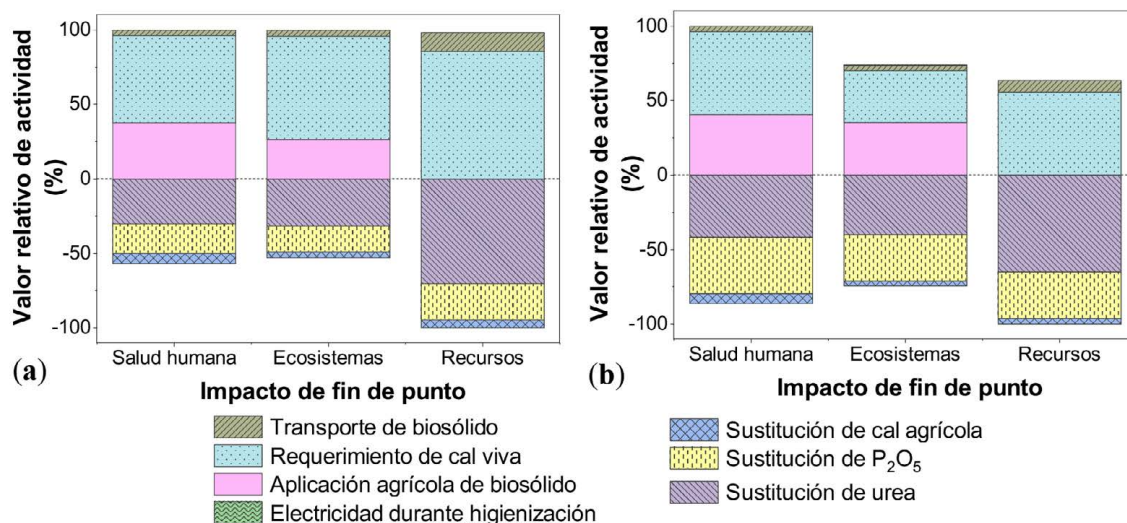


Figura 7. Valor relativo de los impactos de cada actividad asociada al aprovechamiento agrícola del lodo con sustitución de cal agrícola: (a) lodo anaeróbico (E4-A) y (b) lodo aeróbico (E4-B).

Figure 7. Relative value of the impacts of each activity associated with the agricultural utilization of sludge with agricultural lime substitution: (a) anaerobic sludge (E4-A); (b) aerobic sludge (E4-B).

Según se observa en la **Figura 7**, la sustitución de urea y de roca fosfórica logran compensar una parte importante de los impactos de la materia prima del proceso de higienización (particularmente la cal viva).

4. Discusión

Los resultados obtenidos mostraron la factibilidad técnica, económica y ambiental de la higienización alcalina del lodo de PTAR (aeróbico y anaeróbico) para su aprovechamiento en la agricultura. En relación con la eficacia del proceso de higienización alcalina, los resultados experimentales mostraron que con una dosis de 40 % de cal (pH superior a 12.0) se logra un biosólido tipo A, cumpliendo con los requerimientos de la reglamentación vigente en el país (DE-39316-S, 2015). Es posible que en estudios previos realizados en Costa Rica (Sánchez Castillo, 2021), en los cuales no se logró el cumplimiento con este límite, se haya debido a una dosificación de cal inferior a 30 % o a un control inadecuado de la humedad del lodo (en este estudio se utilizó 75 %). Además, este trabajo permitió complementar el trabajo de Masís-Meléndez *et al.* (2021), al mostrar que la calidad del biosólido se consigue casi de inmediato y se mantiene por más de 30 días en el lodo sin recrecimiento bacteriano durante este período.

Por su parte, la pérdida de nitrógeno amoniacal observada en el biosólido (**Figura 4**) se explicaría por el equilibrio de pH entre el amoníaco gaseoso (NH₃) y el ion amonio (NH₄⁺). Al subir el pH a más de 12 se desplaza el equilibrio entre este par ácido/base (pKa de 9.26, según



Perry *et al.*, (1997), lo cual produce la generación de más base (NH_3) en estado gaseoso que se volatiliza y se pierde de la fase sólida, y que tiene un importante efecto bactericida en el proceso de higienización del lodo. Con respecto al nitrato en el lodo, es posible que esta concentración menor se deba más al efecto de “dilución” que tiene la mezcla de cal viva (un material inerte sin nitrógeno, solo compuesto con Ca y O), y no a una “pérdida” por volatilización u otro tipo de proceso o reacción.

Al analizar los parámetros que más influyen sobre la diferencia entre los costos de disposición en relleno sanitario, fue posible identificar que el costo de la cal presenta el mayor impacto. Para que el proceso genere ingresos netos (

Figura 5) en el escenario E3-B, sería necesario que la cal sea mucho más económica, de apenas un 50 % del costo asumido (USD 0.14/kg de CaO) en el caso del lodo aeróbico. De igual modo, si el valor de la urea aumentara un 50 % (a USD 3.06/kgN), la conversión en biosólido por medio de la higienización alcalina y comercialización (E3-B) daría ganancias netas para el caso del lodo aeróbico (USD 0.3/tonLH) y para el lodo anaeróbico (E3-A) el costo bajaría a USD 38.8/tonLH (una reducción de más de 40 % del costo de la condición base).

Con respecto a la factibilidad financiera del proceso de higienización alcalina, la presencia de nitrógeno y fósforo en el lodo permitiría sustituir una parte de los fertilizantes químicos utilizados en las actividades agrícolas, según principios de economía circular (Soares *et al.*, 2019). El estudio mostró que el costo del proceso de higienización y transporte, para disposición en terrenos agrícolas, sería inferior al de disponer el lodo (sin higienización) en un relleno sanitario autorizado. Inclusive, al considerar también el posible ahorro de compuestos químicos para estabilizar suelos ácidos (cal apagada o agrícola), el balance de costos global generaría un balance neto positivo que podría traducirse en una sostenibilidad financiera de la actividad. Otros estudios también reportan las ventajas económicas de esta práctica en términos de ahorro de fertilizante químico (Bittencourt *et al.*, 2017; Bittencourt *et al.*, 2021; Hadas *et al.*, 2021).

Al considerar las ventajas ambientales, el ACV mostró que el aprovechamiento del lodo después de ser higienizado también es preferible a su disposición en el relleno sanitario autorizado y al entierro descontrolado o envío a un botadero clandestino. A pesar de los impactos relacionados con el consumo de materiales como la cal, o las emisiones de NH_3 y otros gases a la atmósfera durante el proceso de higienización alcalina y la aplicación en la agricultura del biosólido, este impacto es compensado por la sustitución de cal agrícola (cal apagada para el control del pH) y por la sustitución de urea y P_2O_5 .

Las ventajas de usar el lodo en agricultura también han sido inferidas en la literatura por medio de ACV para otros contextos geográficos (Amaral *et al.*, 2018; Murray *et al.*, 2008; Yoshida *et al.*, 2013), pero en este estudio se pudo comparar de forma más directa los distintos tipos de disposición del lodo que se dan en Costa Rica, con el fin de recomendar acciones tanto a nivel nacional como latinoamericano en esta materia.



5. Conclusiones

El artículo evaluó la técnica de higienización alcalina de lodo anaeróbico y aeróbico para plantas de tratamiento de aguas residuales ordinarias, en escala de laboratorio. Se consideró la factibilidad de esta técnica para la generación de un biosólido tipo A, de acuerdo con la reglamentación de Costa Rica a nivel experimental, y los potenciales beneficios económicos y ambientales derivados de su aplicación en la agricultura por medio de un análisis de beneficio/costo y del ciclo de vida, respectivamente. Estos resultados pueden ser generalizados a otros países de América Latina, con condiciones sociales y ambientales similares, en los cuales la gestión del lodo de PTAR también es un desafío ambiental creciente.

Pudo corroborarse que la técnica de higienización alcalina puede producir un biosólido tipo A con dosis de aproximadamente 40 % de cal viva, con concentraciones no detectables de coliformes, huevecillos de helmintos y salmonella, y que este efecto duraría al menos 30 días en la muestra, con lo que se lograría un producto seguro para su aplicación agrícola. Por otro lado, los costos asociados a la higienización se verían parcialmente compensados por los potenciales ahorros en fertilizantes minerales, con posibilidad de generar ahorros netos a nivel social si se aprovecha el biosólido (que posee un elevado pH) en suelos ácidos para reducir el consumo de cal agrícola. En todo caso, el aprovechamiento del biosólido higienizado tendría un costo económico menor al de disponer el lodo en un relleno sanitario. Por último, en términos de impactos en la salud humana, el ambiente y los recursos, el ACV evidenció que la opción de aprovechamiento agrícola del biosólido higienizado con cal tendría ventajas considerables sobre la disposición en relleno sanitario y sobre la disposición no controlada en el suelo o en botaderos ilegales.

Por lo tanto, al considerar las ventajas asociadas a esta práctica sobre la disposición del lodo en rellenos sanitarios, se recomienda continuar con investigaciones a mayor escala que también faciliten la transferencia de este conocimiento hacia el sector técnico y la formulación de políticas públicas que promuevan el aprovechamiento del lodo a nivel agrícola. También es importante estudiar el riesgo asociado a la presencia de metales pesados en el lodo en futuras investigaciones.

6. Agradecimientos

Se agradece la colaboración de las personas operadores y administradoras de las plantas de tratamiento de aguas residuales, quienes facilitaron el lodo de PTAR utilizado en este trabajo, particularmente al señor Josué Martínez y al Ing. Ernesto Jiménez de AyA. Este trabajo fue desarrollado dentro del marco del proyecto C3608 de la Universidad de Costa Rica, con financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación de esta universidad. Asimismo, el autor Ronald Calderón agradece a la Vicerrectoría de Investigación por el otorgamiento de la beca de Trabajo Final de Graduación que permitió financiar una parte de los análisis microbiológicos.



7. Conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

8. Referencias

- Amaral, K. C., Aisse, M. M., Possetti, G. R. C. y Prado, M. R. (2018). Use of life cycle assessment to evaluate environmental impacts associated with the management of sludge and biogas. *Water Science and Technology*, 77(9), 2292-2300. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.146>
- Andreoli, C., Bico, A., Bittencourt, S., Pegorini, E., Possetti, G., Cerqueira, P., Rietow, J. y Aisse, M. (2021). Nota Técnica 4-Higienización de lodo via estabilização alcalina. *Cadernos Técnico Eng Sanit Ambient*, 2(1), 45-58.
- Andreoli, C., Von Sperling, M. y Fernandes, F. (2014). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* (2.da ed.). Editorial UFMG.
- ARESEP. (2024). *Tarifas vigentes electricidad*. <https://aresep.go.cr/electricidad/tarifas/>.
- AWWA. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF).
- Bijekar, S., Padariya, H. D., Yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., Yadav, K. K., Islam, S., Park, S. y Jeon, B. H. (2022). The State of the Art and Emerging Trends in the Wastewater Treatment in Developing Nations. *Water*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/w14162537>
- Bittencourt, S., Aisse, M. M. y Serrat, B. M. (2017). Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(6), 1129-1139. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017156260>
- Bittencourt, S., Matos, A. T., Silva, B. S. da, Miki, M. K. y Bastos, R. (2021). NT2-Aspectos legais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2(1), 17-30.
- Bittencourt, S., Matos, A. T., Silva, B. S. da, Oliveira, F., Chamhum-Silva, L. A., Miki, M. K. y Bico, A. (2021). NT6-Usa agrícola de bio sólido. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2(1), 75-88.
- Bressani-Ribeiro, T., Chamhum-Silva, L. A. y Chernicharo, C. A. L. (2019). Constraints, performance and perspectives of anaerobic sewage treatment: Lessons from full-scale sewage treatment plants in Brazil. *Water Science and Technology*, 80(3), 418-425. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.285>





- Centeno Mora, E., Cruz Zúñiga, N. y Vidal Rivera, P. (2024). Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad. *Revista Ingeniería*, 34(1), 2215-2652. <https://doi.org/10.15517/ri.v34i1.55222>
- Centeno Mora, E. y Murillo Marín, A. (2019). Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 97-110. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.5>
- Ciešlik, B. M., Namiešnik, J. y Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 90, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.031>
- CoopeAgri. (2024). *Cal San Miguel Dolomita 50000g*. <https://www.coopeagrienlinea.cr/products/20924/cal-san-miguel-dolomita-50000g>
- Corominas, L., Byrne, D. M., Guest, J. S., Hospido, A., Roux, P., Shaw, A. y Short, M. D. (2020). The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. *Water Research*, 184, 116058. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116058>
- Datshkovsky, D., Madden, J., Analía, L. y Vidal, G. (2022). *Servicios de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe*. <http://www.iadb.org>
- DE-39316-S. (2015). *Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos*. San José, Costa Rica.
- Ding, A., Zhang, R., Ngo, H. H., He, X., Ma, J., Nan, J. y Li, G. (2021). Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. *Science of the Total Environment*, 769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144451>
- Ecoinvent. (2024). *Ecoinvent Database 3.10*. <https://ecoinvent.org/>
- EPA. (2023). *EPA en línea*. <https://cr.epaenlinea.com/>
- Hadas, E., Mingelgrin, U. y Fine, P. (2021). Economic cost–benefit analysis for the agricultural use of sewage sludge treated with lime and fly ash. *International Journal of Coal Science and Technology*, 8(5), 1099-1107. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00439-z>
- Hernández, M. Á. R., García-Baquero, E. D. y Cervera, J. V. G. (2001). *Lixiviación de metales desde puntos con contaminación residual en la cuenca del Guadamar*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131892671>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. y van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>



- Madrigal, V. (2009). *Estimación de rendimientos de mano de obra en procesos constructivos de viviendas de dos plantas utilizando el sistema de bloques modulares tipo Integra* [Trabajo Final de Graduación para Licenciatura en Ingeniería Civil]. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2023). *Sondeo de Precios de Insumos Agropecuarios en Agroservicios*. http://www.sepsa.go.cr/DOCS/2023-025-SondeoInsumos_diciembre.pdf
- Masis-Meléndez, F., Segura-Montero, F. y Quesada-González, A. (2021). Control of septage sanitization by limes and lactic acid fermentation. *Journal of Environmental Management*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112203>
- Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery* (5Ed). Estados Unidos: McGrawHill.
- MTSS (Ministerio de trabajo y seguridad social). (2023). *Lista de Salarios Mínimos del sector privado-2023*. <https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>
- Murray, A., Horvath, A. y Nelson, K. L. (2008). Hybrid life-cycle environmental and cost inventory of sewage sludge treatment and end-use scenarios: A case study from China. *Environmental Science and Technology*, 42(9), 3163-3169. <https://doi.org/10.1021/es702256w>
- National Institute for Public Health and the Environment of the Netherlands. (2020). *Normalization scores ReCiPe 2016*. <https://www.rivm.nl/en/documenten/normalization-scores-recipe-2016>
- Nemecek, T. y Schnetzer, J. (2011). *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*. Suiza: Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART.
- Perry, S., Perry, R. H., Green, D. W. y Maloney, J. O. (1997). *Chemical Engineers' Handbook* (7th ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Pradel, M., Aissani, L., Villot, J., Baudez, J. C. y Laforest, V. (2016). From waste to added value product: Towards a paradigm shift in life cycle assessment applied to wastewater sludge - A review. *Journal of Cleaner Production*, 131, 60-75. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.076>
- PRé Sustainability. (2024). *Simapro*. <https://simapro.com/>
- Sánchez Castillo, É. (2021). *Mejoramiento de la calidad del lodo de la PTAR Lagos de Lindora, en San José, Costa Rica* [Tesis de grado]. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Soares, A., Mota Filho, C. R., Fdz-Polanco, F., Huang, X., Passos, F., Bressani-Ribeiro, T. y Chernicharo, C. A. L. (2019). Closing cycles in anaerobic-based sewage treatment systems. En C. A. L. Chernicharo y T. Bressani-Ribeiro (Eds.), *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation* (p. 0). IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780409238_0367





- Sugurbekova, G., Nagyzbekkyzy, E., Sarsenova, A., Danlybayeva, G., Anuarbekova, S., Kudai-bergenova, R., Frochot, C., Acherar, S., Zhatkanbayev, Y. y Moldagulova, N. (2023). Sewage Sludge Management and Application in the Form of Sustainable Fertilizer. *Sustainability*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15076112>
- Tarpani, R. R. Z. y Azapagic, A. (2023). Life cycle sustainability assessment of advanced treatment techniques for urban wastewater reuse and sewage sludge resource recovery. *Science of The Total Environment*, 869, 161771. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161771>
- USEPA. (2017). *The Test Method for the Examination of Composting and Compost (TMECC)*. Estados Unidos: Environmental Protection Agency.
- WEF. (2018). *Design of Water Resource Recovery Facilities* (Sixth Ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill Education.
- Yoshida, H., Christensen, T. H. y Schetz, C. (2013). Life cycle assessment of sewage sludge management: A review. *Waste Management and Research*, 31(11), 1083-1101. <https://doi.org/10.1177/0734242X13504446>

