



# ALTERNATIVAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES DESDE UN ENFOQUE SISTÉMICO: UNA REVISIÓN

ALTERNATIVES FOR THE STABILIZATION OF SLUDGE GENERATED IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS FROM A SYSTEMIC APPROACH: A REVIEW

**Rossember Saldaña-Escorcía** • [rsaldanae@unicesar.edu.co](mailto:rsaldanae@unicesar.edu.co)

Ingeniero Ambiental y Sanitario, Grupo de Investigación en Gestión Ambiental y Territorios Sostenible (GE&TES), Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica, Colombia.

**Jeansy Karina Castillo Gámez** • [jkcastillo@unicesar.edu.co](mailto:jkcastillo@unicesar.edu.co)

Estudiante de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica, Colombia.

**Citación:** Saldaña-Escorcía, R., Castillo Gámez, J. (2022). Alternativas de estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales, desde un enfoque sistémico: Una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 175- 194. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.4504>

## RESUMEN

**Contextualización:** el crecimiento demográfico y los problemas ambientales en el ámbito local, nacional e internacional, relacionados con la contaminación de los lodos sin tratar, debido a los volúmenes en aumento de dichos residuos generados por las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), aumenta la degradación del medio ambiente.

**Vacío de conocimiento:** hay deficiencias en los manejos de los lodos residuales por desconocimiento de las alternativas convencionales y sostenibles de estabilización, lo que causa que estos no sean aprovechados, debido a sus características, y terminen siendo desechados en puntos de disposición final, lo cual puede generar severos problemas de contaminación.

**Propósito:** evaluar la literatura científica sobre las alternativas implementadas en la estabilización de lodos residuales generados en las EDAR, mediante una revisión documental y un análisis bibliométrico basado en la construcción de diagramas estratégicos y mapa de co-ocurrencia, con el fin de

identificar las tendencias de investigación en la temática.

**Metodología:** se indagó la literatura científica mediante un algoritmo de búsqueda con conectores booleanos en la base de datos especializada Scopus®, la cual se analizó mediante redes bibliométricas y diagramas estratégicos y se ordenó una base de datos con la información relevante para el análisis conceptual sobre la temática.

**Resultados y conclusiones:** se obtuvieron 1693 documentos enmarcados en las alternativas de estabilización de biosólidos provenientes de las EDAR, lo que permitió identificar que países como Estados Unidos, China, Brasil y España poseen la mayor producción científica sobre la temática. La generación de biosólidos es una problemática que ha fundamentado investigaciones para la gestión adecuada de estos residuos, para así evitar generar problemas de contaminación, dado que las alternativas convencionales más empleadas para el tratamiento de biosólidos son la digestión anaerobia, el espesamiento, la deshidratación y la incineración, que son

eficientes en la gestión, pero desaprovechan el potencial de dichos residuos. Las alternativas como el compostaje y la lombricultura generan subproductos que se pueden aprovechar y de esta forma lograr una disposición final de manera adecuada,

que reduzca los costos operacionales y genere beneficios económicos.

**Palabras clave:** contaminación; estabilización; gestión ambiental; lodos residuales; tecnologías; tratamiento del agua

## ABSTRACT

**Contextualization:** Population growth and environmental problems at the local, national and international levels related to pollution from untreated sludge, due to the increasing volumes of such waste generated by wastewater treatment plants (WWTPs), increase environmental degradation.

**Knowledge gap:** There are deficiencies in the management of sewage sludge, attributable to a lack of knowledge of conventional and sustainable stabilization alternatives, which means that the sludge is not used, because of its characteristics, and is placed at final disposal points, which can generate severe contamination problems.

**Purpose:** Evaluate the scientific literature on the alternatives implemented in the stabilization of sewage sludge generated in WWTPs, through a documentary review and a bibliometric analysis based on the construction of strategic diagrams and a co-occurrence map, to identify research trends in the subject.

**Methodology:** Searching of scientific literature was carried out using a searching algorithm with Boolean connectors, in the

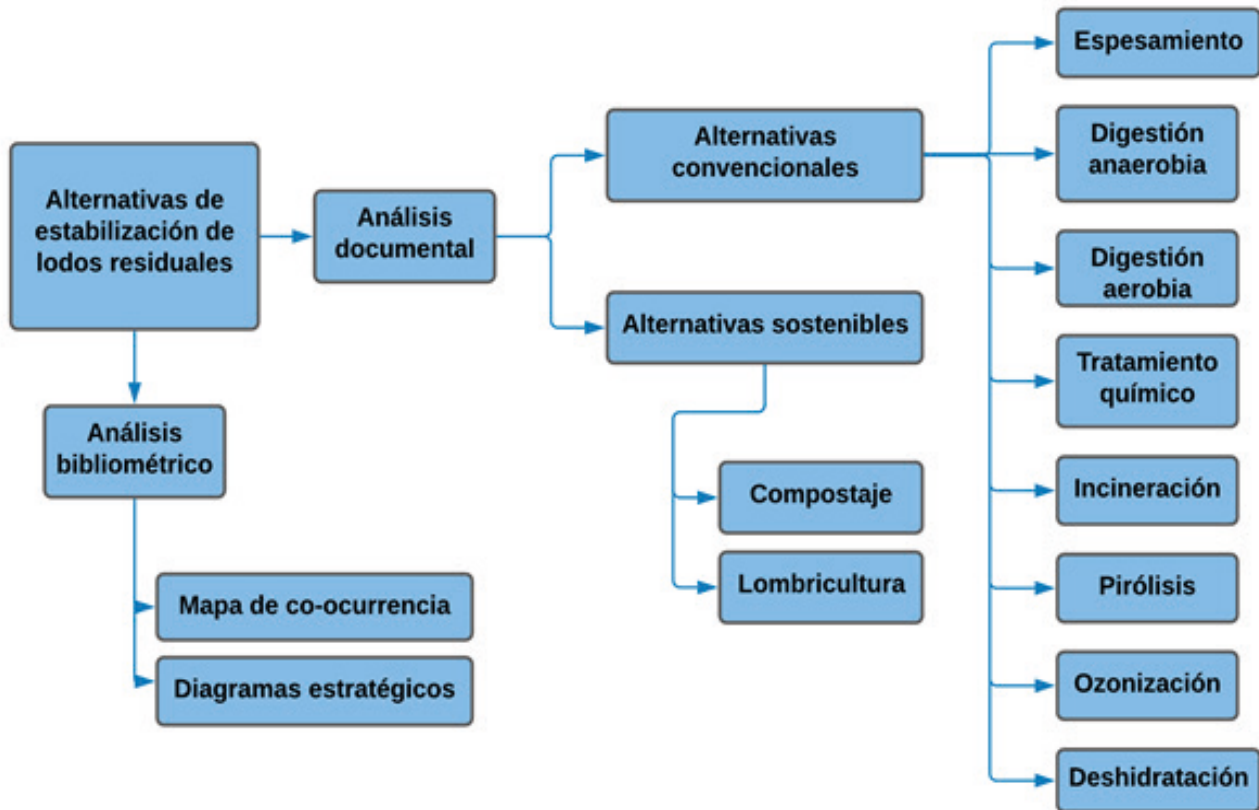
specialized database Scopus®. Then, it was analysed making use of bibliometric networks and strategic diagrams. Later, a data base with the relevant information for the conceptual analysis of the subject was organized.

**Results and conclusions:** A total of 1,693 documents about biosolids stabilization alternatives from WWTPs were found, pointing out that countries such as the United States, China, Brazil, and Spain, have the highest scientific production on the subject. The generation of biosolids is a problem that has originated researches about the proper management of this waste to avoid pollution problems, since the most used alternatives are anaerobic digestion, thickening, dehydration and incineration, which are efficient in management, but do not take advantage of the potential exploitation of these wastes. Alternatives such as composting and vermiculture generate by-products that could be used to achieve an adequate final disposal, reducing operational costs and obtaining economic benefits.

**Keywords:** pollution; stabilization; environmental management; sewage sludge; technologies; water treatment



## RESUMEN GRÁFICO



**Fuente:** autores

### 1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un asunto que debido al paso de los años, al crecimiento demográfico y a los avances tecnológicos y científicos, ha tomado gran importancia, en especial si de contribuir al medio ambiente se trata. Este proceso busca evitar que las aguas servidas, las cuales cuentan con altas concentraciones de microorganismos patógenos, materia orgánica, nutrientes e incluso metales pesados (Donado, 2013; Parra, 2015), sean dispuestas directamente en afluentes, los cuales superan su capacidad natural de depuración, lo que afecta a las poblaciones que se benefician de los servicios ecosistémicos y también las especies de fauna y flora que en ellos habitan.

Ahora bien, es importante destacar que de los 32 países de América Latina, 9 disponen de información completa referente a la generación, tratamiento y reutilización de aguas residuales, 10 de ellos presentan

información parcial y los 13 restantes no reportan (Utria-Borges et al., 2008). Colombia hace parte de los países con información parcial, reportando una producción de 274 toneladas de lodos/día que proviene de las diferentes EDAR. Sin embargo, no se tiene en cuenta aquellas plantas municipales que no reportan información (Castellanos-Rozo et al., 2018).

En la actualidad, uno de los principales retos que enfrentan las empresas que prestan servicios como los de acueducto y alcantarillado, es el método que deben usar para realizar la adecuada disposición de los lodos que se generan como subproducto, pues estos representan una importante fuente de contaminación (Magee et al., 2018; Utria-Borges et al., 2008). Sin embargo, la disposición final de los lodos genera ciertos gastos económicos, puesto que requieren de la instalación de reactores o de sistemas de estabilización para el tratamiento. Es por ello que, en ciertas ocasiones, son vertidos sin

tratamiento alguno a los cuerpos de agua, al igual que a los rellenos sanitarios, lo que aumenta la contaminación ambiental (Castillo Sánchez et al., 2020).

Hasta el momento, alrededor del mundo se han realizado diversas investigaciones respecto a este tema. Con base en ellas, se han podido identificar las principales técnicas para el tratamiento de lodos: físicas, químicas y biológicas. Se han implementado, además, algunos métodos de estabilización: el tratamiento químico (Husillos Rodríguez et al., 2012), la incineración (Silva-Leal et al., 2013), la deshidratación (Santos et al., 2016), el compostaje (Awasthi et al., 2018) y el vermicompostaje (Chávez Porras et al., 2017).

Asimismo, autores como Torres Lozada et al. (2009) emplearon tratamientos químicos para tratar los lodos, que tuvieron como resultado la disminución de la carga de microorganismos patógenos, mediante la cal viva o hidratada. Por otra parte, se han empleado alternativas sostenibles como el compostaje. Ramírez-Coutiño et al. (2013) determinó la viabilidad que tiene el compostaje para estabilizar los lodos residuales y obtener como subproducto un abono orgánico que puede emplearse en la regeneración de los suelos degradados (Grajales et al., 2006).

De igual manera se han utilizado métodos sostenibles que emplean lombrices, alimentadas con diferentes sustratos. Este es el caso de Xing et al. (2012) y Nguyen et al. (2021) quienes determinaron los cambios químicos en el subproducto obtenido, así como las concentraciones de micro y macronutrientes, mientras que Hait y Tare (2011a, 2011b) lograron obtener, a través de la lombricultura como proceso integral, un material de relleno y/o una fuente de cultivo microbiano. A nivel económico, estas técnicas han sido consolidadas como estrategia crucial para el desarrollo de la economía circular en el mundo, lo que disminuye el impacto ambiental que los lodos pueden generar (Lim et al., 2016; Rorat & Vandenbulcke, 2019).

En algunos estudios se ha mostrado que los lodos residuales pueden emplearse para la elaboración de ladrillos. La introducción de lodos en este proceso resulta de especial

interés, debido a que determinados materiales cerámicos disponen de gran capacidad para inactivar metales pesados (Fuentes Molina et al., 2019). Además, para la fabricación de cemento pueden utilizarse lodos previamente tratados con cal, empleándolos como materia prima alternativa, ya que aportan calcio en el crudo, en sustitución de la caliza (Rodríguez Fernández, 2019; Valderrama, 2013).

Los biosólidos pueden emplearse de muchas formas. Sin embargo, el desconocimiento en relación con las alternativas de estabilización, impide el aprovechamiento del subproducto, lo que supondría la obtención de beneficios económicos y ambientales. Por consiguiente, el presente artículo tiene como propósito evaluar la literatura científica sobre las alternativas implementadas en la estabilización de lodos residuales generados en las EDAR, por medio de una revisión documental, un análisis bibliométrico basado en la construcción de diagramas estratégicos y un mapa de coocurrencia, con el fin de identificar las tendencias de investigación en la temática.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La elaboración del artículo comprende un tipo de investigación cualitativo-documental, que permite identificar las principales tendencias de las investigaciones mundiales en un área de conocimiento específica, mediante la revisión documental (Gómez et al., 2015), a partir del proceso de selección de la documentación científica (Figura 1). Para lograr esto se realizó una búsqueda sistemática de información científica, utilizando la base de datos especializada Scopus (Scopus, 2020).

En la primera etapa se identificaron las palabras clave, mediante la gestión de una matriz, para seleccionar el siguiente algoritmo de búsqueda: "sewage sludge" OR "biosolids" AND "stabilization". Mediante este algoritmo fue posible recopilar los documentos para realizar el análisis bibliométrico en el software SciMAT 1.1.04. La literatura obtenida fue segregada en 7 periodos: (2000-2002), (2003-2005), (2006-2008), (2009-2011), (2012-2014), (2015-2017) y (2018-2021) y fue utilizada para la construcción los diagramas estratégicos mediante las



medidas de centralidad y densidad, utilizando la metodología propuesta por Cobo et al. (2012). Además, se estableció en el software la siguiente configuración para la obtención de dichos diagramas: la elección de palabras claves como unidad de investigación, coocurrencia para la construcción de los diagramas, el índice de equivalencia como medida de similitud y algoritmos de centros simples para la agrupación de los ejes temáticos.

El diagrama estratégico posee dos ejes divididos en cuatro categorías o cuadrantes: en el cuadrante superior derecho se encuentran los temas motores que están bien desarrollados y son fundamentales para la construcción del campo científico; en el cuadrante superior izquierdo, temas periféricos caracterizados por un desarrollo especializado interno, pero aislados de los temas externos teniendo una escasa relevancia.

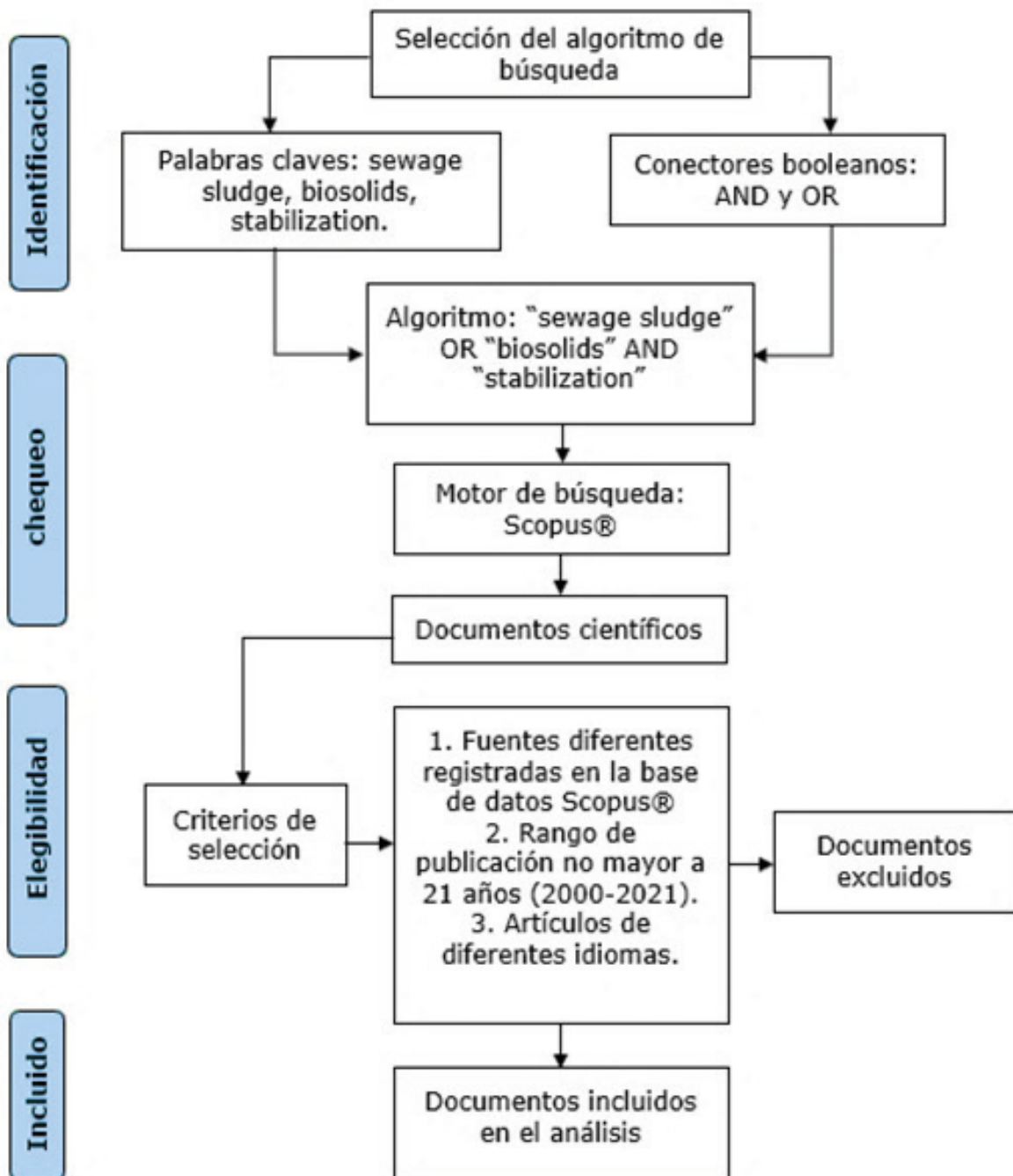


Figura 1. Diagrama metodológico de selección. Fuente: autores.

En el cuadrante inferior izquierdo se incluyen los temas emergentes o en desaparición ya que tienen una centralidad y densidad baja por ser temas de escaso desarrollo en el campo científico. Por último, el cuadrante inferior derecho muestra los temas importantes pero básicos, y los transversales con desarrollo precario (Álvarez-Marin et al., 2017; Montero-Díaz et al., 2018).

Por otra parte, se utilizó el software VOSviewer para la construcción del mapa basado en la matriz de co-ocurrencia adoptando la técnica VOS propuesta por (Van Eck y Waltman, 2010), la cual implementa la medida de similitud conocida como índice de proximidad (Van Eck et al., 2006). El mapa muestra colores que indican el grupo asignado, mientras las líneas entre elementos señalan la relación de los ejes temáticos.

Posteriormente, los resultados obtenidos en SciMAT se clasificaron de la siguiente manera: países, instituciones y revistas más productivas; autores que predominan con mayor productividad y artículos con más citas en la temática. Con estas clasificaciones se realizó un análisis descriptivo del tema en cuestión. Asimismo, con los registros obtenidos por medio del algoritmo de búsqueda, se realizó la evaluación de títulos y resúmenes y, seguidamente, del texto completo de los artículos seleccionados por su relevancia. La extracción y análisis crítico de los datos se llevó a cabo mediante una matriz, teniendo en cuenta los hallazgos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis bibliométrico

El desarrollo del análisis bibliométrico inició con la ejecución del algoritmo obtenido en la matriz de búsqueda, en el que se seleccionó un lapso de 21 años. El resultado final incluyó 1693 publicaciones, las cuales se dividieron en 1404 (82.93 %) artículos originales, 171 (10.10 %) comunicaciones breves, 59 (3.48 %) revisiones, 35 (2.07 %) capítulos de libros y 12 (0.71 %) documento de conferencia.

El manejo inadecuado de los lodos residuales se ha generado principalmente por el desconocimiento de las alternativas de estabilización, lo que conlleva a focos de contaminación debido a las características que estos poseen. En consecuencia, se ha generado una mayor producción en el campo de la investigación por autores tales como

Halden, R. U., que con 25 documentos es el autor con más publicaciones; seguido por Smith, S. R., y Zhu, N., los cuales tienen 18 artículos publicados; así como por Yang, J., con 17; y Wang, H., con 15 documentos sobre la temática. Como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Autores con mayor número de artículos acerca del tratamiento de lodos.

SCR	Autores	TP
1	Halden, R. U.	25
2	Smith, S. R.	18
3	Zhu, N.	18
4	Yang, J.	17
5	Wang, H.	15
6	Wang, Y.	14
7	Grobelak, A.	13
8	Dentel, S.K.	13
9	Venkatesan, A.K.	12
10	Sampaio, R.A.	12

SCR: Standard Competition Ranking, TP: número total de documentos.

**Fuente:** Autores a partir de datos recopilados en Scopus®.

En la Tabla 2 se puede observar la participación de los diferentes países en la producción científica sobre manejo de lodos residuales, estableciendo que Estados Unidos con el 19 % (369 documentos) tiene el mayor porcentaje de publicaciones relacionadas con el tema, seguido por China con 14 % (268), Brasil con 10 % (198), España con 9 % (171) y Polonia con 8 % (150).

**Tabla 2.** Países con mayor número de artículos sobre la temática.

SCR	País	TP
1	Estados Unidos	369
2	China	268
3	Brasil	198
4	España	171
5	Polonia	150
6	Reino Unido	104
7	Canadá	100
8	Australia	86
9	Italia	75
10	Francia	73

SCR: Standard Competition Ranking, TP: Número total de documentos.

**Fuente:** Autores a partir de datos recopilados en Scopus®.



Adicional a esto, en la Tabla 3 se muestra la clasificación de instituciones más productivas por cantidad de publicaciones sobre el tema. La lista está encabezada por la Universidad Tecnológica de Częstochowa (Polonia), seguida de la Universidad de São Paulo (Brasil); lo que indica correlación con los países con mayor número de publicaciones, como se puede observar en la Tabla 2.

Por otra parte, la Tabla 4 muestra las diez (10) principales revistas que poseen mayor número de artículos científicos sobre la temática de tratamiento de lodos. De acuerdo con esto, 127 documentos se publicaron en la revista *Water Science and Technology*, 82 en *Bioresource Technology* y 59 en el *Science of the Total Environment*.

**Tabla 3.** Instituciones con mayor número de publicaciones respecto al manejo de lodos.

SCR	Institución	TP
1	Universidad Tecnológica de Częstochowa	48
2	Universidade de São Paulo - USP	43
3	Universidad de Tongji	43
4	Academia china de ciencias	36
5	UNESP-Universidade Estadual Paulista	33
6	Universidad del estado de Arizona	31
7	Colegio Imperial de Londres	27
8	Universidade Federal de Minas Gerais	26
9	Ministerio de Educación de China	25
10	Universidad de Florida	24

SCR: Standard Competition Ranking, TP: Número total de documentos.

**Fuente:** Autores a partir de datos recopilados en Scopus®.

**Tabla 4.** Revistas más productivas sobre el tema.

SCR	Revista	TP	SRJ2020	Q	H	País
1	Water Science and Technology	127	0.41	3	137	Reino Unido
2	Bioresource Technology	82	2.49	1	294	Holanda
3	Science of the Total Environment	59	1.8	1	244	Holanda
4	Chemosphere	56	1.63	1	248	Reino Unido
5	Journal of Hazardous Materials	54	2.03	1	284	Holanda
6	Waste Management	52	1.81	1	161	Reino Unido
7	Water Research	50	3.1	1	303	Holanda
8	Journal of Environmental Management	31	1.44	1	179	Estados Unidos
9	Environmental Science and Pollution Research	31	0.85	2	113	Alemania
10	Environmental Science and Technology	29	2.32	1	107	Reino Unido

SRJ: Scientific Journal Ranking, TP: número total de documentos, Q: Cuartil, H: H-Index.

**Fuente:** Autores a partir de datos recopilados de Scimago y ScimAT.

De acuerdo con el Scientific Journal Ranking (SJR), las diez revistas tienen un índice  $h > 100$  y ocho se encuentran en el cuartil 1 (Q1), mientras que las dos restantes están en cuartil 2 y 3 (Q2, Q3). El Índice H y los cuartiles muestran el nivel de impacto, relevancia y calidad científica que poseen dichas revistas. Al mismo tiempo, Holanda y Reino Unido son los países con mayor

publicación de revistas sobre la temática analizada; seguidos por Alemania y Estados Unidos, que poseen una revista cada uno como se muestra en la Tabla 4.

Por otra parte, se encontraron cuatro artículos con más de 500 citas. Hasta ahora, el artículo más citado ha sido "Potential benefits and risks of land application of

sewage sludge" con 702 citas, publicado en el 2008 en la revista *Waste Management*, cómo se puede visualizar en la tabla 5. Asimismo, siete de los diez artículos más citados se publicaron en las revistas *Waste Management*, *Bioresource Technology*, *Science of the Total Environment*, *Water Research* y *Journal of Hazardous Materials*, las cuales se encuentran dentro de las diez revistas con mayor número de publicaciones de la tabla 4.

Los diagramas estratégicos muestran cómo los temas relevantes para el desarrollo de la temática analizada en el campo científico,

tales como los suelos agrícolas, residuos, actividades enzimáticas y las lombrices de tierra, están asociados con la evaluación de los impactos ambientales generados por los lodos residuales (Figura 2a). También los temas transversales dejan ver como los lodos están relacionados con las aguas residuales, las propiedades del suelo y el riesgo ambiental que generan. De igual manera, los lodos se relacionan estrechamente con el tratamiento de las aguas residuales, la materia orgánica, las concentraciones de sustancias inorgánicas y la estabilización de estos (Figura 2b).

**Tabla 5.** Artículos más citados acerca del tratamiento de lodos.

SCR	Título	Autores-Año	Revista	Citas
1	Potential benefits and risks of land application of sewage sludge	(Singh y Agrawal, 2008)	Waste Management	702
2	A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge	(Smith, 2009)	Environment International	626
3	Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils	(Ma et al., 2011)	Biotechnology Advances	902
4	Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries	(Kelessidis y Stasinakis, 2012)	Waste Management	610
5	Review of 'emerging' organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids	(Clarke y Smith, 2011)	Environment International	494
6	The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend	(Liang et al., 2003)	Bioresource Technology	424
7	Organic chemicals in sewage sludges	(Harrison et al., 2006)	Science of the Total Environment	359
8	Pharmaceuticals and personal care products in archived U.S. biosolids from the 2001 EPA national sewage sludge survey	(McClellan y Halden, 2010)	Water Research	352
9	Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature	(Gavala et al., 2003)	Water Research	315
10	Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials	(Li et al., 2001)	Journal of Hazardous Materials	295

**Fuente:** Autores a partir de datos recopilados en SciMAT.



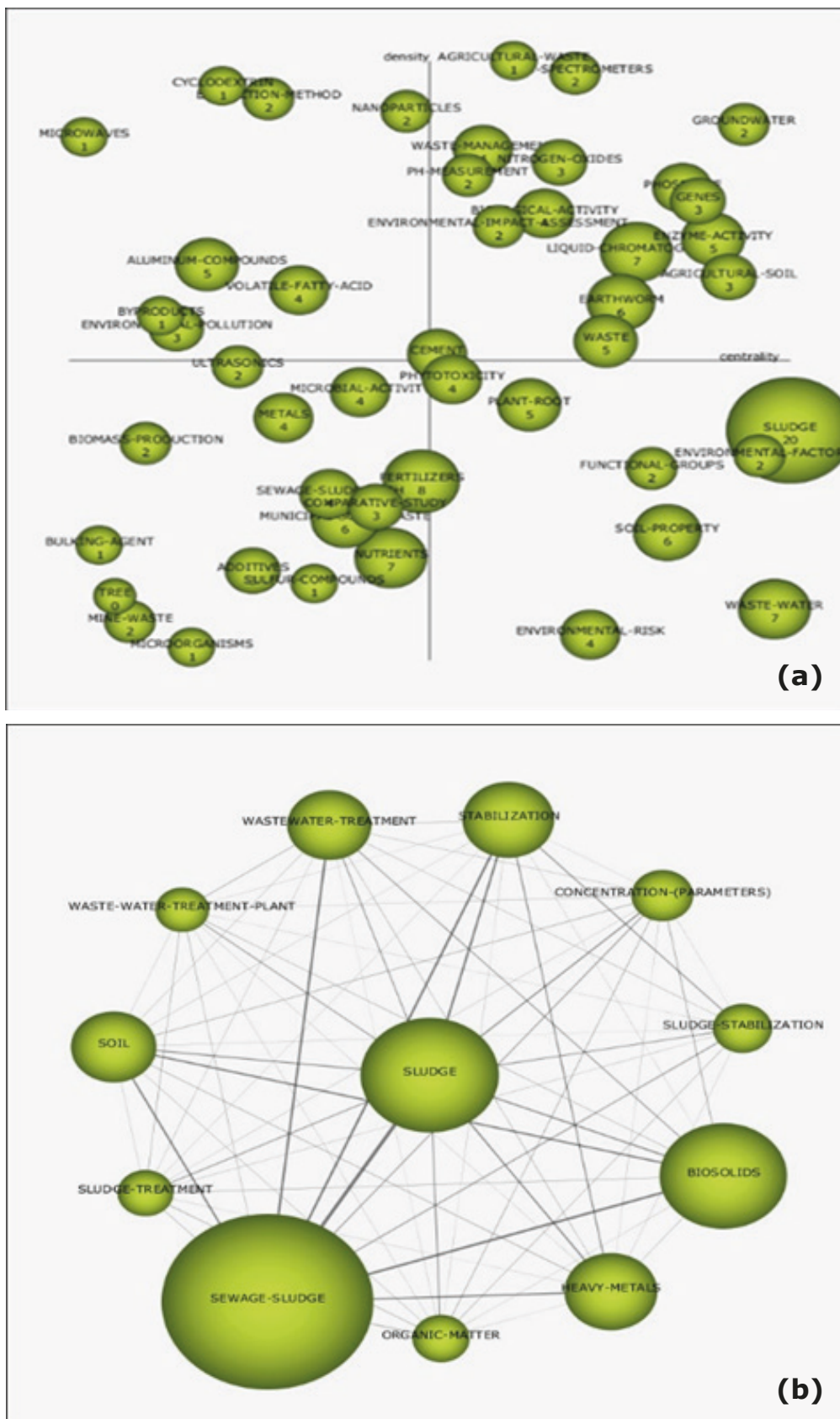


Figura 2. Diagramas estratégicos.

Fuente: Autores a partir de datos recopilados en SciMAT.

Por otra parte, en la Figura 2a se observa que temas centrados en las nanopartículas, los compuestos de aluminio, la contaminación ambiental, los bioproductos y las sustancias volátiles se han estudiado. Sin embargo, no están entrelazados con la temática en general. A su vez, temas como fertilizantes, nutrientes, actividad microbiana y producción de biomasa han quedado marginados en el campo investigativo.

En el mapa de coocurrencia (Figura 3) se pueden apreciar cinco ejes temáticos o clústers (wastewater treatment, biosolids, sewage,

sludge and stabilization) representados por distintos colores (Rojo, amarillo, verde, azul y morado). Esto permite apreciar los nexos de unos conceptos con otros, puesto que estas son las temáticas con mayor estudio u ocurrencia. De igual manera, se puede notar que el primer eje temático se centró en el tratamiento de las aguas residuales, particularmente en la actividad microbiana, así como en las partes del proceso y los residuos generados durante el tratamiento. Este eje incluyó palabras como biorreactores, sólidos, patógenos, bacterias.

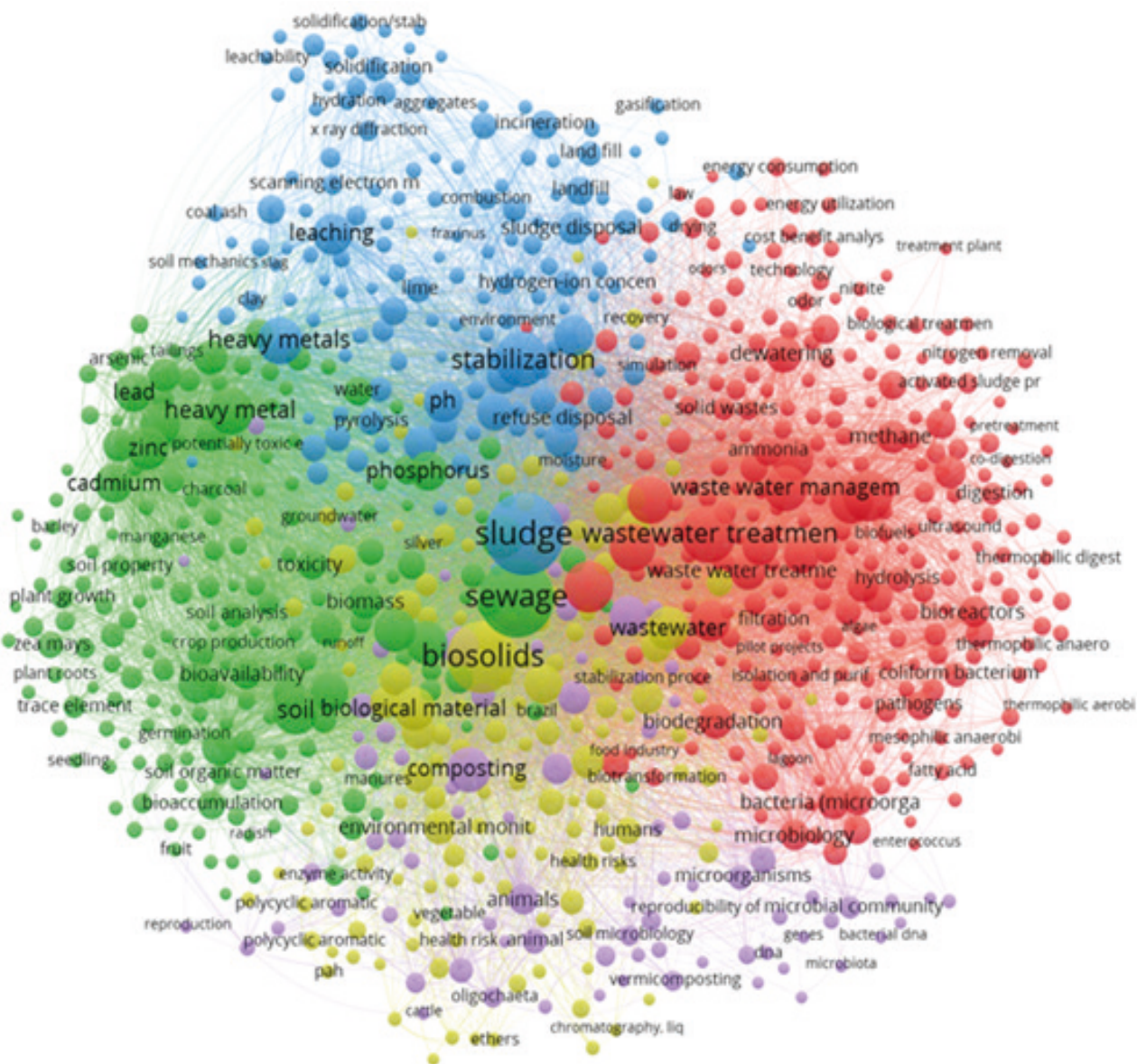


Figura 3. Mapa de co-ocurrencia.

Fuente: Autores a partir de VOSviewer.



El segundo eje temático se relaciona con la generación de biosólidos y sus beneficios. Este grupo reunió palabras claves como las siguientes: crecimiento de plantas, enmienda del suelo, compostaje, entre otras. El tercer eje temático aglutina diferentes aspectos relacionados con el tratamiento de aguas, características fisicoquímicas, actividad microbiana, al igual que la generación de lodos. Asimismo, el conjunto de temas del cuarto eje temático se vinculó con trabajos sobre la toxicidad, la generación de lodos, los metales pasados y características físicas como el pH. Por último, el quinto eje temático se centró principalmente con los métodos para la estabilización de los lodos residuales como estos: digestión anaerobia y aerobia, incineración, compostaje, vermicompostaje y solidificación (deshidratación). Además, hace mención de descriptores claves como aguas residuales, tratamientos, metales pesados y actividad microbiana.

### 3.2 Generación de lodos residuales, desde una perspectiva general

A nivel mundial, el crecimiento demográfico y la demanda del agua hacen que los volúmenes de aguas residuales se eleven cada día más (Bora et al., 2020; Patel et al., 2019; Potisek-Talavera et al., 2010). Las diferentes actividades productivas y domésticas producen grandes cantidades de aguas residuales y por ende de lodos. Estas aguas residuales contienen una diversidad amplia de contaminantes y hace que presenten, cada una, alguna característica particular que va a determinar cuál será el tratamiento más adecuado a aplicar (Díaz-Cuenca et al., 2012; Choudri y Charabi, 2019).

Los lodos residuales poseen diversas características, ya que depende del grado de tratamiento en que se produzcan y según el tipo de agua residual que manejan las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) (Chu y He, 2020; Patel et al., 2019). En consecuencia, las EDAR generan diferentes tipos de lodos: lodos de precipitación primaria, lodos secundarios, lodos de precipitación química, lodos de estratos bacterianos y lodos digeridos (Hey y Simms, 2021; Serpa, 2017).

Asimismo, los lodos residuales pueden contener diversos tipos de materiales inorgánicos como metales pesados,

químicos, patógenos, bacterias, protozoarios, helmintos, entre otros. Esto causa que sea de gran preocupación la gestión que se le da a dichos residuos, ya que ponen en riesgo la salud y el medio ambiente (Castillo et al., 2020; Magee et al., 2018; Meng et al., 2016). No obstante, estos tienen un gran contenido de materia orgánica que generan frecuentemente, brindando así múltiples oportunidades de implementar modelos o estrategias de reutilización (Bora et al., 2020).

Por esta razón, los lodos residuales son objeto de procesos investigativos con el fin de implementar gestiones adecuadas para crear nuevos productos finales, sin tener la necesidad de disponerlos en vertederos (Chu y He, 2020). La reutilización de los biosólidos estabilizados en el suelo aporta material orgánico y nutrientes suficientes. Este aporte es ventajoso para la relación suelo-planta, lo que contribuye a la preservación de los recursos naturales y reduce al mínimo los efectos para la salud pública (Quinchía y Carmona, 2004; Vélez, 2007).

### 3.3 Alternativas convencionales

La necesidad de la estabilización o del tratamiento de los lodos depende de la disposición o reutilización que se pretenda darles, con tres propósitos fundamentales: la eliminación de olores, la disminución del potencial de putrefacción y la reducción de la carga patógena. Estos son procesos cuyo estudio se ha desarrollado escasamente (Figura 2a), debido a que implican un reto económico y de ingeniería, ya que la cantidad de lodos generada en las EDAR es tal, que se requiere de inversión en infraestructura y tecnologías para reducir su volumen y el contenido contaminante (Holguín et al., 2014; Huang et al., 2020).

En consecuencia, para la realización adecuada de los procesos de estabilización y eliminación de los lodos residuales es importante identificar características como la calidad, la cantidad, las condiciones físicas del lugar y los costos que se requieren para su manejo (García et al., 2006). Por otra parte, también se han contemplado diferentes tipos de alternativas de estabilización para lodos residuales generados en las EDAR, como las siguientes:

**Espesamiento:** proceso de reducción volumétrica y de concentración mediante procedimientos físicos relacionados con la flotación, el espesado por gravedad y la centrifugación (Amador-Díaz et al., 2015; Marín, 2019). El espesamiento por flotación consiste en saturar con aire la solución, con presiones entre las 2 a 4 atmósferas (atm). El aire es liberado mediante burbujas y eso conlleva que el lodo precipite de forma ascendente para removerse.

El espesamiento por gravedad se ha empleado para el tratamiento de lodos primarios con buenos resultados. Este tratamiento se realiza en un reactor o tanque de sedimentación, en el cual el mecanismo rotatorio hace que las partículas de sedimentos se compacten y aumenten su tamaño, lo cual hace que dichas partículas caigan al fondo para extraerse. Por último, el espesamiento por centrifugado es un proceso en el que se aplica fuerza centrífuga, empujando el material hacia las paredes del reactor, lo que facilita su remoción (Gualoto, 2017).

**Digestión anaerobia:** proceso que se lleva a cabo dentro de un reactor en ausencia de oxígeno en el que se degrada la materia orgánica, teniendo como resultado la formación de ácidos volátiles y gas metano (Appels et al., 2008; Nguyen et al., 2021; Tulun y Bilgin, 2019; Yu et al., 2014). La digestión anaerobia se considera adecuada para los lodos primarios y los mixtos cuyo contenido de sólidos volátiles supera el 50% y no poseen sustancias inhibitorias (Gualoto, 2017).

**Digestión aerobia:** este proceso de estabilización de los lodos ocurre en aireación prolongada para conseguir la producción de microorganismos aerobios, hasta exceder el periodo de síntesis de las células, logrando así la autooxidación (Pérez, 2016). Por otra parte, métodos como la digestión aerobia psicrófila y mesófila son los menos usados, debido a los tiempos empleados que van desde los 10 a los 30 días (Mahamud et al., 1996).

**Tratamiento químico:** proceso bactericida que bloquea temporalmente la fermentación ácida en los lodos residuales. Consiste en

eleva el pH en un rango mayor a 12, en un periodo de tiempo mínimo de 2 horas, con el fin de establecer un ambiente desfavorable para los microorganismos. Esto impide la descomposición de la materia, evitando así riesgos para la salud pública (Gualoto, 2017). En dicho proceso, la cal es el reactivo que más se utiliza debido a la alcalinidad y a los costos reducidos (Marín, 2019).

**Incineración:** proceso de combustión (800 °C aproximadamente) de lodos cuya producción de masa residual es menor, la cual es constituida por materiales minerales inoos (Chu y He, 2020; Oliva et al., 2019; Patel et al., 2020). Este proceso está diseñado para reducción de los lodos en un 75 % de su volumen y emplea sistemas para secar o incinerar como secadores tipo Flash, pulverizadores o evaporadores de efectos múltiples (Gualoto, 2017; Pérez, 2016).

**Pirólisis:** reducción de los lodos en ausencia o baja presencia de oxígeno. Esta reducción ocurre en dos velocidades, rápida y lenta. En la primera, hay una fase de calentamiento rápido en un periodo corto de tiempo, mientras que en la segunda hay una velocidad de calentamiento lenta en un tiempo prolongado (Álvarez et al., 2015; Li et al., 2021; Patel et al., 2019).

**Ozonización:** proceso de oxidación en el cual se emplea como agente oxidante al ozono. Este gas es efectivo para la eliminación de las características de color y olor, reduce el 90% del volumen de los lodos en cortos periodos de tiempo, y además permite que la actividad bacteriana sea inactivada con facilidad (Amador-Díaz et al., 2015).

**Deshidratación:** es un proceso natural en el que los lodos son puestos en compartimientos con fondos porosos, lo cual permite la incidencia de la luz solar y el viento, logrando así que estos se deshidraten (Castellanos-Rozo et al., 2018). Pueden emplearse métodos estáticos, entre ellos el lecho de secado, el cual consiste en la remoción de agua mediante un filtro de área y grava. También puede emplearse la evaporación, la cual es empleada también en los sistemas de lagunaje. El filtro al vacío, por su parte, remueve el agua gracias a filtros que posee en su tambor rotatorio. El filtro



prensa, a su vez, aplica presión por medio de bandejas hasta obtener lodo compactado, removiendo el agua completamente (Gualoto, 2017).

Las alternativas convencionales poseen diversas ventajas y desventajas que limitan su aplicación en las EDAR. Por ejemplo, el espesamiento y la deshidratación son alternativas que reducen los costos operacionales. Sin embargo, el espesamiento por flotación y el centrifugado aumentan los costos de mantenimiento (Castellanos-Rozo et al., 2018; Gualoto, 2017). Por otra parte, algunas alternativas presentan procesos lentos de degradación, producen olores y no destruyen la materia orgánica. Es decir, ciertas alternativas requieren de la aplicación de otro método complementario para lograr estabilizar los lodos y cumplir así con la normativa establecida, lo que aumenta los costos.


### 3.4 Alternativas sostenibles

La gestión de los sólidos y el tratamiento de los lodos residuales es uno de los procesos con mayores costos económicos en términos del tratamiento de las aguas residuales. Por eso, el perfeccionamiento de alternativas de estabilización o tratamientos rentables y sostenibles es fundamental en el área de la gestión de desechos (Nguyen et al., 2021; Neumann et al., 2016). Es por ello que algunas de las alternativas empleadas muestran relación con las tendencias actuales observadas en el quinto eje temático (Figura 3), siendo estas:

**Compostaje:** proceso rentable que consiste en la descomposición aeróbica, termófila y regulada de los microorganismos que estabilizan la materia orgánica del lodo, formando así un nuevo producto estable e inocuo, de color marrón y con olor a humus (Gao et al., 2019; Huevo, 2011; Li et al., 2020; Mahamud et al., 1996; Pan et al., 2018).

**Lombricultura:** es una biotecnología que emplea únicamente lombrices, las cuales pueden ser de las especies roja californiana (*Eisenia Foetida*) o roja africana (*Fudrillus* sp.). Dichas especies, con ayuda de los microorganismos, alteran las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los lodos, mediante su digestión y excreción. De esta forma, pueden transformarlos en productos libres de contaminantes y con mayor contenido de nutrientes (Albornoz y Ortega, 2017; Rimassa, 2019).

Las alternativas sostenibles, al igual que las convencionales, presentan sus ventajas y desventajas. El compostaje requiere de grandes áreas y el suministro de aire. Así mismo, presenta procesos de degradación lenta y costos de operación moderados, pero el producto obtenido resulta de alta calidad para fines agrícolas. Por otra parte, la lombricultura es económicamente viable y con operación sencilla. Sin embargo, requiere de monitoreos constantes y de tratamiento previo, cuando los lodos presentan contenidos de metales pesados y productos farmacéuticos (Gualoto, 2017).

En general, las líneas de estabilización de lodos residuales se encuentran enfocadas en dos propósitos fundamentales: reducción de volumen y de poder fermentativo. El primer propósito puede obtenerse por un simple espesamiento, deshidratación, incineración o escurrido mecánico. El segundo, por otra parte, pretende reducir la actividad y contenido bacteriano causantes de diversas enfermedades y se consigue mediante la digestión anaeróbica o aeróbica, así como por la estabilización química de los lodos (Patel, Kundu, Halder, Ratnayake, et al., 2020; Trejos y Agudelo, 2012). De cualquier forma, lo que se busca es manejar de forma adecuada los lodos residuales, y de esta forma minimizar el impacto ambiental generado, así como proporcionar una actividad económica con la cual se puedan obtener nuevos beneficios. 

## CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico permitió conocer que los países con mayor producción y publicación sobre la temática del tratamiento de lodos fueron Estados Unidos (con 369 documentos) y China (con 268 documentos), seguidos Brasil y España (con más de 150 escritos cada uno). Asimismo, las revistas científicas Water Science and Technology y Bioresource Technology son las que cuentan con mayor producción de publicaciones sobre este tema. De igual manera, las instituciones como la Universidad Tecnológica de Częstochowa, Universidade de Sao Paulo y la Universidad de Tongji se encuentran entre los primeros tres lugares de la clasificación, con más de 40 documentos publicados sobre la temática.

La generación de lodos residuales está directamente relacionada con la producción de aguas residuales en el mundo. Debido a esto, las alternativas para el manejo de los lodos han evolucionado en las últimas décadas con el fin de disminuir la contaminación que puedan generar; así como la búsqueda de estrategias rentables para la disposición final de estos, ya que poseen diferentes nutrientes que brindan oportunidades para la reutilización en otros sectores. Por esa razón, la selección del método de estabilización es fundamental para el aprovechamiento de los lodos residuales, teniendo en cuenta las características que estos poseen.

Las alternativas más empleadas en la actualidad para el manejo de los lodos son

la digestión anaerobia, el espesamiento, la deshidratación, la incineración y el compostaje, las cuales logran estabilizar la actividad bacteriana y reducir la materia orgánica. Sin embargo, cada alternativa genera costos adicionales a los gastos operacionales del tratamiento de las aguas residuales, haciendo (en la mayoría de los casos) inviable económicamente su implementación, lo que conlleva a la disposición de los lodos en los rellenos sanitarios.

No obstante, las alternativas sostenibles (como el compostaje y la lombricultura) generan subproductos que se pueden aprovechar, ya que tienen diversas ventajas como mejoradores de suelos degradados o para su uso en la agricultura, pues aportan nutrientes y materia orgánica, las cuales mejoran las condiciones químicas y físicas del suelo. Adicionalmente, las alternativas sostenibles logran dar una disposición final de manera adecuada a los lodos, reducen los costos operacionales y generan beneficios económicos por la comercialización de los biosólidos. Es por esto que, frente a la problemática de los lodos residuales generados por el saneamiento de aguas residuales domésticas e industriales, es pertinente agilizar las investigaciones cuyo fin sea generar nuevas alternativas que permitan el aprovechamiento del 100 % de estos residuos.

### CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

**Rossember Saldaña-Escorcía:** metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura (borrador original), revisión y edición.

**Jeansy Karina Castillo Gámez:** metodología, investigación, análisis de datos y escritura (borrador original).

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la candidata doctoral, Lorena Sánchez Donado, por la revisión y comentarios efectuados en el Documento.

### LITERATURA CITADA

Albornoz, A. M. y Ortega, E. M. (2017). *Evaluación de la eficiencia de la lombriz roja Californiana E. foetida para estabilización de lodos residuales de la PTAR Salitre* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas de Aquino]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2864>

Álvarez-Marin, A., Castillo-Vergara, M. y Geldes-González, C. (2017). Análisis Bibliométrico de la Realidad Aumentada y su Relación con la Administración de Negocios. *Información tecnológica*, 28(4),



57–66. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000400008>

Álvarez, J., Amutio, M., Lopez, G., Barbarias, I., Bilbao, J. & Olazar, M. (2015). Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering Journal*, 273, 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.047>

Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E. y Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 1–10.

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J. & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, (6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2008.06.002>

Awasthi, M. K., Wang, Q., Chen, H., Awasthi, S. K., Wang, M., Ren, X., Zhao, J., & Zhang, Z. (2018). Beneficial effect of mixture of additives amendment on enzymatic activities, organic matter degradation and humification during biosolids co-composting. *Bioresource Technology*, 247, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.061>

Bora, R. R., Richardson, R. E. & You, F. (2020). Resource recovery and waste-to-energy from wastewater sludge via thermochemical conversion technologies in support of circular economy: a comprehensive review. *BMC Chemical Engineering*, 2(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s42480-020-00031-3>

Castellanos-Rozo, J., Merchán, N. A., Galvis, J. y Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 242–251. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>

Castillo, J. G., Balarezo, L. D., Vences, M. B. y Zambrano, H. A. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Riemat*, 5(1), 23–27. <https://doi.org/10.33936/riemat.v5i1.2499>

Chávez Porras, Á., Velásquez Castiblanco, Y. L., & Casallas Ortega, N. D. (2017). Características físico-químicas de humus obtenido de biosólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales. *Informador Técnico*, 81(2), 122. <https://doi.org/10.23850/22565035.v81.n2.2017>

Choudri, B. S. & Charabi, Y. (2019). Health effects associated with wastewater treatment, reuse, and disposal. *Water Environment Research* 91(10), 976–983. <https://doi.org/10.1002/wer.1157>

Chu, L. & He, W. (2020). Toxic metals in soil due to the land application of sewage sludge in China: Spatiotemporal variations and influencing factors. *Science of the Total Environment*, 757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143813>

Clarke, B. O. & Smith, S. R. (2011). Review of 'emerging' organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids. *Environment International*, 37 (1), 226–247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.06.004>

Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E. & Herrera, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63(8), 1609–1630. <https://doi.org/10.1002/asi.22688>

Díaz-Cuenca, E., Alavarado-Granados, A. R. y Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 14(1), 78–97. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>

Donado, R. (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana] Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10554/13496>

Fuentes Molina, N., Isenia León, S. A., & Ascencio Mendoza, J. G. (2019). Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas. *Revista EIA*, 16(32), 13–25. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1061>

Gao, X., Tan, W., Zhao, Y., Wu, J., Sun, Q., Qi, H., Xie, X. & Wei, Z. (2019). Diversity in the Mechanisms of Humin Formation during Composting with Different Materials. *Environmental Science and Technology*, 53(7), 3653–3662. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06401>

García, H., El , M., Morán, H., Acosta, Y., Senior, A. y Fernández, N. (2006). Análisis comparativo de dos técnicas de digestión para la determinación de metales pesados en lodos residuales. *Multiciencias*, 6(3), 234–243. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90460305.pdf>

Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P. & Ahring, B. K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, 37(19), 4561–4572. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00401-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00401-9)

Gómez, M., Galeano, C. y Jaramillo, D. (2015). El Estado Del Arte: Una Metodología De Investigación. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 6(2), 423–442. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.21501/issn.2216-1201>

Grajales, S. J., Monsalve, J. A., & Castaño, J. M. (2006). Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia Et Technica*, XII(31), 285–290. <https://doi.org/10.22517/23447214.6453>

Gualoto, J. J. (2017). *Propuesta de Gestión de Lodos Residuales Municipales. Caso de Estudio: Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Parroquia Rural de Nono* [Tesis de pregrado , Escuela Politécnica Nacional] Bibdigital. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17066>

Hait, S., & Tare, V. (2011a). Vermistabilization of primary sewage sludge. *Bioresource Technology*, 102(3), 2812–2820. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.031>

Hait, S., & Tare, V. (2011b). Optimizing vermistabilization of waste activated sludge using vermicompost as bulking material. *Waste Management*, 31(3), 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.004>

Harrison, E. Z., Oakes, S. R., Hysell, M. & Hay, A. (2006). Organic chemicals in sewage sludges. *Science of the Total Environment* 367(2–3), 481–497 r. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.04.002>

Hey, C. & Simms, P. (2021). Preliminary assessment of biosolids in covers with capillary barrier effects. *Engineering Geology*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105973>

Holguín, E. J., Morales, M. I., Vicencio, M. G. y Morales, M. del S. (2014). Lodos residuales: métodos de tratamiento, estabilización y aprovechamiento. *Vid supra*, 6(2), 61–66.

Huang, Y., Chiueh, P. & Lo, S. (2020). Energy recovery from sewage sludge: Product characteristics, heating value prediction and reaction kinetics. *Chemosphere*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128783>

Huezo, L. A. (2011). Caracterización Hidrológica y balance hídrico de la microcuenca Santa Inés, Honduras [Universidad Zamorano]. Archivo digital. <http://hdl.handle.net/11036/407>

Husillos Rodríguez, N., Granados, R. J., Blanco-Varela, M. T., Cortina, J. L., Martínez-Ramírez, S., Marsal, M., Guillem, M., Puig, J., Fos, C., Larrotcha, E., & Flores, J. (2012). Evaluation of a lime-mediated sewage sludge stabilisation process. Product characterisation and technological validation for its use in the cement industry. *Waste Management*, 32(3), 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.021>





- Kelessidis, A. & Stasinakis, A. S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management, 32*(6), 1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>
- Li, C., Xie, S., You, F., Zhu, X., Li, J., Xu, X., Yu, G., Wang, Y. & Angelidaki, I. (2021). Heavy metal stabilization and improved biochar generation via pyrolysis of hydrothermally treated sewage sludge with antibiotic mycelial residue. *Waste Management, 119*(1), 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.050>
- Li, R., Xu, K., Ali, A., Deng, H., Cai, H., Wang, Q., Pan, J., Chang, C., Liu, H. & Zhang, Z. (2020). Sulfur-aided composting facilitates ammonia release mitigation, endocrine disrupting chemicals degradation and biosolids stabilization. *Bioresource Technology, 312*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123653>
- Li, X. D., Poon, C. S., Sun, H., Lo, I. M. C. & Kirk, D. W. (2001). Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials, 82*(3), 215–230. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00360-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00360-5)
- Liang, C., Das, K. C. & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology, 86*(2), 131–137. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00153-0)
- Lim, S. L., Lee, L. H., & Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production, 111*, 262–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083>
- Ma, Y., Prasad, M. N. V., Rajkumar, M. & Freitas, H. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology Advances, 29*, (2), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.12.001>
- Magee, H. Y., Maurer, M. M., Cobos, A., Pycke, B. F. G., Venkatesan, A. K., Magee, D., Scotch, M., & Halden, R. U. (2018). U.S. nationwide reconnaissance of ten infrequently monitored antibiotics in municipal biosolids. *Science of the Total Environment, 643*, 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.206>
- Mahamud, M., Gutiérrez, A. y Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas: Métodos de tratamientos. *Ingeniería Del Agua, 3*(3), 45–54. <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2703>
- Marín, D. (2019). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante órgano-mineral [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. Archivo digital. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7393>
- McClellan, K. & Halden, R. U. (2010). Pharmaceuticals and personal care products in archived U.S. biosolids from the 2001 EPA national sewage sludge survey. *Water Research, 44*(2), 658–668. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.032>
- Meng, X., Venkatesan, A. K., Ni, Y., Steele, J. C., Wu, L., Bignert, A., Bergman, Å. & Halden, R. U. (2016). Organic Contaminants in Chinese Sewage Sludge: A Meta-Analysis of the Literature of the Past 30 Years. *Environmental Science and Technology, 50*(11), 5454–5466. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05583>
- Montero-Díaz, J., Cobo, M., Gutiérrez-Salcedo, M., Segado-Boj, F. & Herrera-Viedma, E. (2018). A science mapping analysis of “Communication” WoS subject category (1980-2013). *Comunicar, 26*(55), 81–91. <https://doi.org/10.3916/C55-2018-08>
- Neumann, P., Pesante, S., Venegas, M. & Vidal, G. (2016). Developments in pre-treatment methods to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Reviews in*

*Environmental Science and Biotechnology*, 15 (2) 173–211. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9396-8>

Nguyen, V. K., Chaudhary D. K., Dahal, R. H., Trinh, N. H., Kim, J., Chang, S. W., Hong, Y., La, D. D., Nguyen, X. C., Ngo, H. H., Chung, W. J. & Nguyen, D. D. (2021). Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Fuel*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119105>

Oliva, M., Vargas, F. & Lopez, M. (2019). Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. *Journal of Cleaner Production*, 223, 1029–1041. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.147>

Pan, J., Cai, H., Zhang, Z., Liu, H., Li, R., Mao, H., Awasthi, M. K., Wang, Q. & Zhai, L. (2018). Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction. *Bioresource Technology*, 270, 467–475. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.050>

Parra, R. (2015). Anaerobic digestion: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159. <https://bit.ly/2RFUbwz>

Patel, S., Kundu, S., Halder, P., Marzbali, M. H., Chiang, K., Surapaneni, A. & Shah, K. (2020). Production of hydrogen by catalytic methane decomposition using biochar and activated char produced from biosolids pyrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(55), 29978–29992. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.036>

Patel, S., Kundu, S., Halder, P., Ratnnayake, N., Marzbali, M. H., Aktar, S., Selezneva, E., Paz-Ferreiro, J., Surapaneni, A., De Figueiredo, C. C., Sharma, A., Megharaj, M. & Shah, K. (2020). A critical literature review on biosolids to biochar: an alternative biosolids management option. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(4), 807–841. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09553-x>

Patel, S., Kundu, S., Halder, P., Rickards, L., Paz-Ferreiro, J., Surapaneni, A., Madapusi, S. & Shah, K. (2019). Thermogravimetric Analysis of biosolids pyrolysis in the presence of mineral oxides. *Renewable Energy*, 141, 707–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.047>

Pérez, M. E. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb) [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana] Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12045>

Potisek-Talavera, M. D., Figueroa-Viramontes, U. González-Cervantes, G., Jasso-Ibarra, R. y Orona-Castillo, I. (2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrientes. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 327–333. <https://bit.ly/3hK6VNr>

Quinchía, A. y Carmona, D. (2004). Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. *Revista EIA*, 2, 89–108. <https://bit.ly/3oJ4agK>

Ramírez-Coutiño, V., Wrobel, K., Wrobel, K., Navarro, R., Godínez, L. A., Teutli-León, M., & Rodríguez, F. (2013). Evaluation of the composting process in digested sewage sludge from a municipal wastewater treatment plant in the city of San Miguel de Allende, central Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(SUPPL. 3), 89–97.

Rimassa, L. M. (2019). *Propuestas de tratamiento de los lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas*. [Tesis de pregrado, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil] Repositorio digital. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/3486>

Rodríguez Fernández, M. C. (2019). *Evaluación del uso de lodos de una planta de tratamiento de agua residual de la industria*



de autolavado como sustituto parcial en la elaboración del cemento. Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/44941>

Rorat, A., & Vandenbulcke, F. (2019). Earthworms converting domestic and food industry wastes into biofertilizer. In *Industrial and Municipal Sludge: Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery* (pp. 83–106). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00005-2>

Santos, D. S., Teshima, E., Dias, S. M. F., Araújo, R. A., & Silva, C. M. R. da. (2016). Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(2), 341–349. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016100531>

Scopus (2020). *SciVerse Scopus*. <http://www.elsevier.com/online-tools/scopus>

Serpa, M. S. (2017). Remoción de metales pesados de Cd y Hg en lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria el Espinar- Puno, utilizando vermicomposteo [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5070>

Silva-Leal, J., Bedoya-Rios, D., & Torres-Lozada, P. (2013). Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química Nova*, 36(2), 207–214. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000200002>

Singh, R. P. & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>

Smith, S. R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 35(1), 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.009>

Torres Lozada, P., Madera, C. A., & Silva Leal, J. A. (2009). Eliminación de patógenos en biosólidos por estabilización alcalina. *Acta Agronómica*, 58(3), 197–205. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/25560>

Trejos, M. y Agudelo, N. (2012). *Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa "Comestibles La Rosa" como alternativa para la generación de biosólidos* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio institucional. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/2775>

Tulun, Ş. & Bilgin, M. (2019). Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by chemical pretreatment. *Fuel*, 254, 115671. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115671>

Utria-Borges, E., Cabrera-Rodríguez, J. A., Reynaldo-Escobar, I. M., Morales-Guevara, D., Fernández, A. M. y Toledo, E. (2008). Utilización agraria de los biosólidos y su influencia en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* MILL). *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 14(1), 33–39. <https://doi.org/10.5154/rchsh.2006.02.009>

Valderrama, M. L. (2013). *Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del Municipio de Chinavita (Boyaca)*. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/944>

Van Eck, N. J. & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84, 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

Van Eck, N. J., Waltman, L., a Berg, J. V. D & Kaymak, U. (2006). Visualizing the computational intelligence field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 6–10. <https://doi.org/10.1109/mci.2006.329702>

Vélez, J. A. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción + Limpia*, 2(2), 57–71. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/532>

Xing, M., Li, X., Yang, J., Huang, Z., & Lu, Y. (2012). Changes in the chemical characteristics of water-extracted organic matter from vermicomposting of sewage sludge and cow dung. *Journal of Hazardous Materials*, 205–206, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.070>

Yu, B., Xu, J., Yuan, H., Lou, Z., Lin, J. & Zhu, N. (2014). Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by electrochemical pretreatment. *Fuel*, 130, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.031>

**Conflicto de intereses**

*Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.*

