



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES  
PROVENIENTES DE LAS PTAR PARA LA REDUCCIÓN DEL  
IMPACTO AMBIENTAL”

Trabajo de Investigación para optar el grado de:  
BACHILLER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Esthefani Andrea Ayala Garibay (0000-0001-8105-2918)

Asesor:

Ing. Luis Abraham Gomero Osorio (0000-0002-4739-2094)

Lima – Perú

2019



**RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N° 244-2020-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA**

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 16 de noviembre de 2020

**VISTO:**

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado:  
"APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DE LAS PTAR PARA LA  
REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL", presentado por:

- Esthefani Andrea Ayala Garibay

**CONSIDERANDO:**

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

**SE RESUELVE:**

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: "APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DE LAS PTAR PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL" con N° de registro de la carrera: **0104-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Luis Abraham Gomero Osorio** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,

**Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca**  
Director Académico de Carrera  
Ingeniería Ambiental

APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES QUE PROVENIEN DE LAS PTAR  
PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Esthefani Andrea Ayala Garibay\*, Luis Abraham Gomero Osorio

Facultad de ciencias Ambientales. Universidad Científica del Sur. Lima – Perú

\*Correo de correspondencia: esthefaniandrea98@hotmail.com

## RESUMEN

La cantidad de incremento de lodos residuales provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en todo el mundo se caracterizan por ser residuos peligrosos debido a su alto contenido de metales pesados y microorganismos patógenos, lo cual representa un riesgo para el medio ambiente debido a su mala disposición final, ya que la mayor parte termina en botaderos generando la contaminación de los cuerpos receptores, atracción de vectores y enfermedades, por otro lado estos son incinerados generando el desprendimiento tanto de gases y cenizas, siendo la principal fuente del incremento de Gases de Efecto Invernadero, sin embargo cabe mencionar que estos subproductos son ricos en materia orgánica, macro y micronutrientes por lo que deben de ser aprovechados, para lo cual existen normativas para su regulación cuya principal finalidad es mitigar el cambio climático mediante su minimización y manejo adecuado por parte de los diferentes sectores. Es por ello que el principal objetivo de la presente revisión teórica es ver los posibles aprovechamientos para la gestión de los lodos, enfocándonos tanto en la evaluación de la sostenibilidad del ambiente, económica y técnica, por lo que se han desarrollado diferentes criterios para la elección de la opción más adecuada, porque los lodos presentan valores valiosos en cuanto a energía y materia.

**Palabras claves:** lodos, materia orgánica, nutrientes, patógenos, metales, energía, vertedero, GEI

## ABSTRACT

The amount of waste sludge from the Wastewater Treatment Plant worldwide is characterized as hazardous waste due to its high content of heavy metals and pathogenic microorganisms, which

represents a risk to the environment due to its final bad disposition, since most of it ends up in dumps generating pollution of the receiving bodies, attracting vectors and diseases, on the other hand these are incinerated generating the release of both gases and ashes, being the main source of the increase of Gases of Greenhouse effect, however, it is worth mentioning that these by-products are rich in organic, macro and micronutrient matter, so they must be used, for which there are regulations for their regulation whose main purpose is to mitigate climate change through minimization and proper management by Part of the different sectors. That is why the main objective of this theoretical review is to see the possible uses for sludge management, focusing both on the evaluation of environmental, economic and technical sustainability, so different criteria for the choice have been developed of the most appropriate option, because sludge has valuable values in terms of energy and matter.

**Keywords:** sludge, organic matter, nutrients, pathogens, metals, energy, landfill, GHG

## **REVISIÓN TEÓRICA**

### **1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales**

En la actualidad, las plantas de tratamiento de aguas residuales tanto domesticas e industriales (Operaza, 2006), representan una herramienta tecnológica fundamental para el saneamiento básico del crecimiento de la población, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos para su tratamiento (Cieslik, Namiessnik, & Konieczka, 2015), permitiendo la limpieza de las aguas contaminadas que son generadas por las diferentes actividades diarias en cada sector (María, Martínez, Claudia, & Octaviano, 2018). Siendo tratadas en el lugar donde son generadas o llevadas mediante red de tuberías a una planta de tratamiento municipal, cuyas aguas abarcan descargas residenciales, comerciales e industriales, también pueden incluir precipitaciones pluviales (Saturnino, 2016), para así realizar una disposición adecuada y ser dirigidos hacia efluentes superficiales, denominado medio receptor, de esta manera se lleva a cabo el reaprovechamiento del agua, reduce las afecciones a la salud y mejora la calidad del medio

ambiente, por eso son sometidos a estrictos tratamientos para el cumplimiento de los estándares de descarga (Amador-díaz, Veliz-lorenzo, & Bataller-venta, 2015).

Sin embargo, durante este proceso se generan grandes volúmenes de lodos, que quedan como resultado después de haber finalizado el recorrido de depuración, cuyas características dependen de la procedencia de las aguas residuales y el tipo de tratamiento sometido (Qian *et al.*, 2016). Este subproducto representa un elevado riesgo para la salud pública y el ambiente, debido a que concentran gran cantidad de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos (Espigares & Pérez, 2000), ya que son dispuestos sin realizar algún tipo de tratamiento en lugares no autorizados a pesar de su gran problemática (Feng, Luo, & Chen, 2015), donde la mayor cantidad de lodos terminan en tiraderos a cielo abierto causando la contaminación de cuerpos receptores como los suelos, agua subterránea y el aire, ocasionando problemas a la salud por la atracción de diferentes tipos de vectores (Operaza, 2006). Por lo cual, antes de realizar el aprovechamiento o disposición, estos lodos deben ser sometidos a diferentes procesos de estabilización, para disminuir volumen, patógenos, olores y vectores, para evitar que causen inconvenientes en el medio ambiente (Limón, 2013).

## **2. Emisiones de GEI por la producción de lodos en PTAR a nivel global, latinoamericano y Perú.**

Las cantidades y los volúmenes de lodo que se generan debido al crecimiento de construcciones de plantas depuradoras para tratar las aguas residuales a niveles admisibles, están aumentando (Amador-díaz *et al.*, 2015), estos representan un problema a nivel mundial debido al desprendimiento del 2,8 % de Gases de Efecto Invernadero, que son generados en menor a mayor escala por los países, siendo México el contribuidor del 1% de los GEI a nivel mundial del cual el 9% se debe a los lodos, ya que de las 2 029 PTAR se producen anualmente 640 millones de toneladas de lodos, siendo dispuesto el 64% en rellenos (Rojas & Mendoza, 2011). Por otro lado los lodos generados al año en Estados Unidos es de 7, 2 millones de toneladas, donde el 49% es utilizado en agricultura, 45% es acondicionado en relleno o incinerado y lo restante en otros usos (Llivichuzca, 2016), en Europa la producción es de 9 millones de toneladas de lodos anuales, de

los cuales el 45% se aplica a la agricultura, 23% en producción de energía térmica a través de incineración, 18% relleno y 14 % en compostaje (Rojas & Mendoza, 2012), China genera anualmente 6.5 millones de toneladas de lodos, de los cuales el 45% va a la agricultura, 34.4 % relleno, 3.5 % en ganadería e incinerado con la misma cantidad y el resto en diferentes usos (Mateo-Sagasta, Raschid-Sally, & Thebo, 2015). Por otro lado, en América Latina, Brasil destina el 45% de lodos residuales a rellenos sanitarios, 5.6 % en agricultura y 45.4 % es indefinido (Llivichuzca, 2016), Colombia genera 274 toneladas/día de biosólidos (Ruiz & Quevedo, 2017). Por último, en el Perú, Lima genera aproximadamente anualmente 32 000 toneladas de lodos (COSUDE, 2017). Por ello, es conveniente que las PTAR no solo consideren el tratamiento del agua para que vuelva a utilizarse sino también enfocarse a buscar soluciones a la generación de los lodos residuales, para que sus contaminantes no figuren un riesgo a la sociedad y ni al medio ambiente (Rojas & Mendoza, 2011).

### **3. Lodos residuales**

Este subproducto es generado del tratamiento primario, secundario y terciario de las aguas residuales domésticas e industriales (Onofre, 2018). El tratamiento primario se basa en el uso de dispositivos para que debido a la gravedad los sólidos sedimenten, llegándose a eliminar el 60% de SST y 30% de DBO<sub>5</sub>, además se introducen flocculantes orgánicos e inorgánicos para mejorar la calidad del efluente (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006). El tratamiento secundario se basa en procesos de naturaleza biológica con el fin de remover materia orgánica y transformar en sólidos suspendidos (Cristina, 2006). Por último en el tratamiento terciario se eliminan las cargas orgánicas, microorganismos patógenos, detergentes, fosfatos y nitratos residuales además de mejorarse las condiciones de color y olor del agua residual (Rossi Maria, 2010). Los lodos representan un problema debido a su contenido de elementos tóxicos, constituido por la presencia de microorganismos patógenos (virus, helmintos, protozoos y bacterias) y metales pesados (cromo, mercurio, cobre cadmio, níquel, plomo, zinc) (Marín, 2019). Sin embargo, cabe mencionar que los lodos también contienen elementos provechosos debido a su alto contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes (Amador-díaz et al., 2015), lo cual

permite que mediante un tratamiento estos residuos sean aprovechados como fertilizantes o mejoradores de suelo.

### 3.1. Tipos de lodos

Las características físicas, químicas y biológicas de los lodos dependen del origen de las aguas residuales, periodo del año y tratamiento al que se ha sometido, obteniendo lodos primarios, secundarios o terciarios (Pruden, 2018).

**Lodos primarios:** Este subproducto es generado del tratamiento primario de las aguas residuales en el cual se emplean operaciones de cribado, desarenado, desengrasado y sedimentación, para la eliminación de los sólidos en suspensión y materiales flotantes (Marín, 2019). Implica el uso de dispositivos primarios que permiten reducir los flujos y que los sólidos se depositen debido a la gravedad (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006). Donde los lodos se caracterizan por tener aproximadamente 97% de humedad, materia orgánica e intenso olor, por lo que requieren un tratamiento previo antes de su disposición para que estén biológicamente estabilizados y reducir el porcentaje de humedad (Marín, 2019).

**Lodos secundarios:** Este subproducto conocido como lodos activados, proviene del tratamiento biológico, este proceso funciona a base de un reactor que se mantiene en un ambiente aerobio por medio de una aireación difusa o mecánica además del uso de cultivos microbianos (Scott, 2013), donde la aireación de las aguas residuales permite la degradación de la materia orgánica, ya que los microorganismos presentes lo utilizan como nutriente, de esta manera la materia orgánica se oxida permitiendo la disminución de contaminantes, con un 80% de remoción de DBO (Onofre, 2018), cuyo residuo es separado a través de un sedimentador secundario, cuyos lodos resultantes se caracterizan por su apariencia floculenta y bajo olor (Marín, 2019). Asimismo, se pueden utilizar lagunas de estabilización, en las que se encuentran los estanques aeróbicos, anaeróbicos y facultativos, este último se caracteriza por tener tres etapas la primera que es la zona aireada superior, zona facultativa media y la zona anaerobia más baja (Gerba & Pepper, 2015).

**Lodos terciarios:** Estos lodos proceden del tratamiento terciario o avanzado, cuyo objetivo principal es descartar los contaminantes que no se eliminaron en el tratamiento biológico, con el fin de mejorar la calidad de agua y lodo, en nuestro país las tecnologías más usadas en las PTAR son lagunas de oxidación, lagunas aireadas, lodos activados, filtros percoladores sistemas anaerobios y aerobio, los cuales dependen del agua residual que se tenga (Häder, 2017), estos lodos se caracterizan por la reducción del contenido de humedad desde un 90% a 30 % aproximadamente (Marín, 2019).

### 3.2. Normativa para el manejo y reutilización de los lodos residuales

El DL N° 1278 la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, delega al MVCS regular los lodos provenientes de la PTAR mediante el reaprovechamiento, estos deben serlos estabilizados para la obtención de biosólidos, indicado en el capítulo VII, para mitigar el cambio climático, a través de técnicas que favorezcan su minimización y manejo adecuado. Sin embargo, en la actualidad no se cumple con esta normativa por los diferentes sectores (Onofre, 2018).

Estos lodos deben ser analizados para determinar la concentración de nutrientes, patógenos y metales pesados, ya que estos dos últimos representan un problema debido a la elevada toxicidad para los seres vivos (Amador-díaz et al., 2015). Dicha caracterización permite determinar el grado de contaminación de los lodos y clasificar si es un residuo peligroso o no peligroso, para plantear las medidas de manejo y disposición final (Operaza, 2006). Para lo cual, existen normativas que controlan la reutilización de los lodos, una de estas es la norma mexicana, en la cual se indica los LMP de contaminantes para el aprovechamiento y disposición de los lodos, clasificándolos en excelentes y buenos en base seca, de acuerdo a la cantidad de metales pesados (ver tabla 1) y en clases A, B, C en función de la cantidad de patógenos y parásitos (ver tabla 2); el aprovechamiento está basado en función del tipo y clase (ver tabla 3) (Amador-díaz et al., 2015).

Tabla 1: LMP de metales pesados en lodos.

<b>Contaminante</b>	<b>Excelente (mg/kg)</b>	<b>Bueno (mg/kg)</b>
<b>As</b>	41	75

<b>Cd</b>	39	85
<b>Cr</b>	1200	3000
<b>Cu</b>	1500	4300
<b>Pb</b>	300	840
<b>Hg</b>	17	57
<b>Ni</b>	420	420
<b>Zn</b>	2800	7500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 2: LMP de patógenos y parásitos en lodos.

<b>Clase</b>	<b>Bacterias</b>	<b>Patógenos</b>	<b>Parásitos</b>
	NMP/g base seca		huevos/g base seca
	Coliformes fecales	<i>Salmonella spp</i>	Huevos de helminto
<b>A</b>	< 1000	< 3	< 1
<b>B</b>	< 1000	< 3	< 10
<b>C</b>	< 2 000 000	< 300	< 25

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 3: Aprovechamiento del biosólido de acuerdo con el tipo y clase.

<b>Tipo</b>	<b>Clase</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>Excelente</b>	A	Aplicación con contacto directo en usos urbanos, lo indicado para clase B y C
<b>Excelente o bueno</b>	B	Aplicación sin contacto directo en usos urbanos, lo indicado para la clase C
<b>Excelente o bueno</b>	C	Uso forestal y agrícola, mejoramiento de suelos

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

Otra de las normas más específicas para la clasificación de los lodos residuales es la 503 de la EPA, el cual pertenece a Estados Unidos, dicha norma es utilizada por diversos países (Onofre, 2018), por lo cual se tiene las siguientes dos clases:

**Clase A:** Estos lodos no presentan restricciones de uso en el sector agrícola, debido a que no atraen vectores y a su bajo contenido de metales pesados y ausencia de patógenos.

**Clase B:** Este tipo de lodo sirve para mejorar los suelos, pero de carácter restrictivo para el uso agrícola, por lo que deben de ser sometido a tratamiento para disminuir los contaminantes.

Asimismo esta norma presenta las concentraciones permitidas de metales pesados que deben de presentar los lodos (ver tabla 4), para ser utilizados de manera que no cause daño al suelo, cultivo y a los manipuladores (Amador-díaz et al., 2015).

Tabla 4: LMP de metales pesados en lodos.

<b>Metales</b>	<b>USEPA 503</b> (mg/kg en base seca)
<b>Zn</b>	2800
<b>Pb</b>	300
<b>Cd</b>	39
<b>Cr</b>	41
<b>Cu</b>	1500
<b>Ni</b>	420
<b>Hg</b>	17

#### **4. Tratamiento de lodos residuales**

Antes de llevar a cabo la disposición de los lodos residuales, estos deben ser tratados para lograr su estabilización de esta manera se logra la eliminación de organismos patógenos, reducción de malos olores y volumen (Flandes & Soto, 2017). Con la finalidad de que estos no representen riesgos a la salud, evitar daños a los recursos y se le brinde un valor de uso (Ospina, Rodríguez, & Gonzales, 2012). Para los cuales existen diversos tipos de tratamiento:

**4.2. Espesamiento:** Permite la reducción del volumen del lodo alrededor de un 30% a un 80% a través de la eliminación del contenido de agua (González, 2015), incrementando el contenido de sólidos (Amador-díaz et al., 2015) mediante procesos físicos como la flotación, gravedad, centrifugación y filtros de banda (Marín, 2019).

**4.3. Estabilización:** El objetivo principal de la estabilización es elevar la concentración de sólido mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Onofre, 2018). Los procesos básicos son la digestión anaerobia y aerobia, cal, compostaje y estabilización química (Marín, 2019) como el tratamiento térmico y oxidación húmeda en temperatura y presión elevada permitiendo

una reducción del 30 % al 35% de sólidos suspendidos, olores, atracción de vectores y los patógenos (Amador-díaz et al., 2015).

- **Digestión anaeróbica:** Es la degradación de la materia orgánica e inorgánica se lleva a cabo en un reactor con ausencia de oxígeno, en la cual se forman ácidos volátiles donde las bacterias anaeróbicas la convierten en metano y dióxido de carbono (Operaza, 2006), con intervalos de temperatura mesofílico y termofílico (Marín, 2019). La digestión permite reducir aproximadamente un 50% de volátiles y 70% los sólidos con respecto a su valor original (Cubillos, 2009). Asimismo esta etapa permite llevar a cabo el reusó del lodo en la agricultura y la obtención de biogás, el cual puede ser usado en la generación de energía eléctrica para retribuir parte de la energía que se necesita en la PTAR y energía calorífica para el calentamiento del digestor (Limón, 2013), ya que el biogás puede llegar a producir entre un 50 a 100% de energía que se requiere en el tratamiento (Amador-díaz et al., 2015), dichas fuentes de energía son generados mediante una máquina de cogeneración, la cual permite disminuir emisiones de gases. Sin embargo la desventaja de este proceso es que se requiere mucho tiempo, calentamiento de los lodos y un costo mayor para su construcción, también se requiere de operador especializado para el buen control del proceso a fin de evitar que la concentración de amoníaco presente en el agua del lodo se desestabilice (Limón, 2013).
- **Digestión aeróbica:** Este proceso se emplea en plantas de tratamiento con capacidad menor a 220 l/s (Limón, 2013) sobre tanques abiertos con suministro de aire, para inducir el desarrollo de microorganismo aerobios encargados de la digestión de los lodos, reduciendo en un 35% a 50% de concentración de sólidos volátiles (Cubillos, 2009), donde el costo de operación es mayor, ya que para estabilizar los lodos se necesita suministro de aire, para lo cual se requiere un alto consumo de energía y genera mayor obtención de lodos (Limón, 2013), sin embargo permite alcanzar una adecuada calidad del agua tratada, removiendo nitrógeno, fosforo y materia orgánica (Limón, 2013).
- **Cal:** La estabilización con cal es una alternativa reconocida por US EPA, donde la adición de cal mediante un pH 12 en un periodo de más 2 h permite descartar patógenos y olores,

debido a que se destruyen los microorganismos productores de gases olorosos (Cubillos, 2009), sin embargo si el pH cae luego del tratamiento los biosólidos generados pierden la estabilidad, produciendo la aparición de otros microorganismos (Limón, 2013), no obstante al agregar cal, el lodo aumenta su propiedad de secado y sedimentación, pero disminuye su valor como fertilizante e incrementa alcalinidad (Cubillos, 2009).

## **5. Tipos de aprovechamiento de lodos residuales**

### **5.1. Energía eléctrica a partir de la generación de biogás**

Actualmente los países desarrollados mediante el uso de digestores anaeróbicos emplean el 15% de la generación de lodos en la obtención de energía, la cual es utilizada para proveer electricidad al sistema de digestión de la planta, cuya implementación produce 25 % de energía, reduce el 24 % del volumen de lodos y el 30% de costo al año en cuanto al manejo y disposición final. Cabe mencionar que la potencia de generación de biogás se basa en la medida del pH y al contenido tanto de metales como de elementos tóxicos presente en los lodos, asimismo la potencia de energía eléctrica depende del porcentaje de gas metano presente en el biogás (Rojas & Mendoza, 2011). Cabe mencionar que en la PTAR CESPE de México se produce anualmente 30 000 toneladas de lodo que provienen de las cinco PTAR de la ciudad de Ensenada, estos han venido siendo dispuestos como relleno en tierra por más de 12 años, para un manejo más eficiente se llevó a cabo una estimación obteniendo como resultado que la potencia de biogás que se generaría mediante la construcción del sistema de digestión anaeróbica es de 775 000 m<sup>3</sup> al mes, permitiendo generar 1240 millones de Kwh por mes, por lo que sería suficiente para equipar la demanda energética del sistema de digestión y la planta, ya que la PTAR CESPE consume 649.511 Kwh por mes, permitiendo un ahorro anual de \$5.737.130 pesos, de esta manera México busca reducir su emisión al 0.0044% del 9% de GEI provenientes de los lodos residuales (Rojas & Mendoza, 2011).

En la PTAR de Barcelona, la depuración es el proceso que consume más energía 0.440 kWh/m<sup>3</sup>, derivan de especialmente de bomba y aireadores, y menor relación con los purgadores, centrifugadores y agitadores. En dicho estudio mediante la estimación se pudo demostrar que no era suficiente el potencial energético al usar una sola caldera de gas para abastecer la cantidad de

energía necesaria de la planta, para lo cual se llevó a cabo el uso de motores de cogeneración, ya que este permite aprovechar de la caldera el calor presente en los gases de escape para vaporizar agua y conservar la temperatura en el biodigestor, permitiendo un aprovechamiento energético mucho mayor con eficiencia de 34 % de energía eléctrica y 61% energía térmica, siendo esta última menos usada por la planta, por lo que vieron la manera de usarla mediante digestión termofílica, ya que genera mayor volumen de metano a través del calor residual de la caldera. Además cabe mencionar que el caudal de llega a la depuradora es un factor que determina el potencial de generación de biogás, esto permitió un alcance de 332.39, 300.22 y 257.33 m<sup>3</sup> de biogás al día en la planta A, B, C respectivamente permitiendo generar en la caldera de gas una potencia eléctrica de 28.48, 25.72 y 22.05 kW, por lo que mediante el uso del cogenerador se pudo convertir en 683, 617.27 y 529.09 kWh , lo cual supone un aumento del 20 % de biogás producido y de ahí un 20 % de energía, por lo que cabe mencionar que la planta B en un inicio era la menos viable al no satisfacer el 50% de la demanda energética de la planta sin embargo mediante el uso del motor de cogeneración revirtió la situación, obteniendo valores positivos tales como un tiempo de retorno cercano a los 4 años, con ahorros anuales de 40.000 €, sumado a un VAN por encima de los 18.000 € y un 6% de TIR, haciendo viable el proyecto ya que el precio del gas natural 0.0522 €/kWh es menor a la de energía eléctrica 0.13 €/kWh (Sagastume, 2019).

## **5.2. Compostaje**

En Túnez existe 130 PTAR, los cuales vienen incrementando anualmente 2 millones de toneladas de lodos de depuradora por lo que representa un incremento en el costo de estabilización y disposición final, otro de los problemas que presenta Túnez es la producción anual de un millón de toneladas de desechos proveniente de la industria de procesamiento de aceituna, debido a esto se desarrolló la investigación de la viabilidad del co-compostaje para el tratamiento de los lodos, residuos verdes (p1) y almazara (p2), para lo cual se llevó a cabo la mezcla de lodos con los diferentes residuos, obteniendo como resultado un compostaje libre contaminante con valor agronómico debido a su contenido de P y K, donde los fenoles permitieron la reducción de patógenos, garantizando una buena maduración para el uso de la agricultura, debido a que la aplicación de compostaje en relación de 30% y 50% aumentó la rapidez de germinación y

estructura del tomate y maíz, por consiguiente el compostaje es una alternativa de solución, ya que resulta ser un método eficiente para estabilizar los residuos y reciclar la materia orgánica (Asses, Farhat, Cherif, Hamdi, & Bouallagui, 2018).

### **5.3. Vermicompostaje**

El vermicompostaje se basa en la estabilización y biooxidación de materia orgánica en medio aeróbico por medio de la ingestión de las lombrices permitiendo la generación de humus a partir de la materia orgánica degradada, asimismo mediante su movimiento ayuda a la circulación del aire y agua permitiendo el desplazamiento de nutrientes en el sustrato (Elvira *et al.*, 1998). Este tipo de tecnología presenta mayor ventaja respecto al compostaje, ya que permite menor conservación del proceso, pronta descomposición, disminuye la probabilidad de acidificación y salinización, no origina residuos dañinos, permite mayor retención de agua en el suelo después de su aplicación y la obtención de una mejor calidad del producto desarrollando la buena germinación, crecimiento y rendimiento de la agricultura. Por consiguiente cabe mencionar que el sustrato debe mantener entre el 70 a 90% de humedad, mayor porosidad, poco nitrógeno y proteínas es decir una alta relación C/N (30:1), por lo que se requiere utilizar de manera adicional material estructurante y estiércol de distintas especies, ya que solo los lodos no pueden proporcionar la características indicadas, por otro lado para que las lombrices lleven a cabo una mejor digestión es aconsejable realizar precomposteo del sustrato, dado que este simboliza su alimento y hábitat de la lombriz (Caballero, Jiménez, García, Lucero, & Tello, 2019).

El producto final de vermicompostaje “humus” presenta mejor característica que el compostaje, ya que tiene mayor contenido de nutrientes y nitratos, menor contenido de metales pesados puesto que estos son bioacumulados por las lombrices, asimismo este producto presenta microorganismos benéficos que sirven de protección de posibles enfermedades para las plantas. (Atiyeh *et al.*, 2000). Según un estudio, para tratar lirio acuático utilizaron diferentes concentraciones de lombriz donde señalo que al aumentar la cantidad de lombriz en el vermirreactor generaba el incremento de la generación de humus, ya que se evidencio un cambio de 46.6 % a 93.4% debido a que permitió manejar en corto tiempo grandes sumas de sustrato, no obstante cuando se llevó a cabo la utilización de una densidad superior a 50 lombrices/L en lirio

acuático con lodos primarios y secundarios, la tasa de reproducción de la especie *Eisenia foetida* fue afectado, ya que resulto ser inversamente proporcional al número de individuos presentes en el vermirreactor, por lo que cabe mencionar que este tipo de tratamiento de lodos es limpia debido a que no tiene impacto en el ambiente y su costo es bajo tanto en la inversión como en el mantenimiento (Sharma & Yadav, 2017).

## **6. Disposición final de lodos residuales**

### **6.1. Vertederos**

Según un estudio, en los últimos 10 años en Kuwait se arrojaron el 95% de desechos en 5 vertederos sin revestimiento produciendo grandes cantidades de lixiviados por causa de la inadecuada eliminación de aguas residuales, lodos y residuos sólidos municipales, causando la contaminación de la capa freática por lo cual se realizó un análisis estadístico, obteniendo como resultado que desde 1993 a 2000 se dispusieron  $5,14 \pm 1,13$  millones de toneladas de desechos sólidos en los vertederos, cuya relación de residuos industriales de líquidos y lodos fue de  $1,85 \pm 0,19$  millones de toneladas, los cuales presentan altas concentraciones de DQO, metales y solidos suspendidos, ocasionando la contaminación del agua subterránea, como medida de solución se recomendó el uso de estanques revestidos en el país árido de Kuwait (Yaqout, 2003).

### **6.2. Incineración**

China en el 2015 genero 53.52 mil millones de toneladas de lodos de depuradora y 180 millones de toneladas de residuos sólidos municipales generando pérdidas de \$ 1,467 mil millones por su tratamiento en el 2016, donde los métodos principales de tratamiento son mediante compostaje, vertedero, conversión biológica como la digestión anaeróbica y método de conversión térmica tales como gasificación, pirolisis e incineración, donde la incineración es aceptada por el gobierno chino, debido a que reduce el volumen de los desechos y satisface la demanda energética mediante la generación de electricidad y calefacción, presentando una gran ventaja en comparación con el compostaje o vertedero, ya que menciona que la contaminación secundaria se puede llegar a controlar de manera segura, por ende en el 2015 la capacidad del incinerador alcanzo 0.19

millones de toneladas al día, generando 1.6 GW de electricidad lo que permitió ahorrar 83.125 toneladas de carbón estándar (Chen et al., 2019).

La incineración posibilita la reducción de enormes cantidades de lodos, por lo que en las últimas décadas se ha utilizado la evaluación del ciclo de vida para determinar los beneficios medioambientales y las inoportunidades de los métodos de tratamiento de residuos sólidos, donde al comparar el uso de relleno sanitario e incineración, se concluyó que este último puede requerir más uso de energía debido a su alto contenido de humedad (Lombardelli, Pirone, & Ruggeri, 2017). Por lo cual, en este estudio se plantea la solución frente a esto, el cual consistió en realizar un tratamiento integrado mediante la mezcla de lodos de depuradora y residuos sólidos municipales, para evaluar cuantitativamente los impactos ambientales, energéticos y económicos de la incineración, ya que estos se producen al mismo tiempo en grandes cantidades en la ciudad de México. Para lo cual se analizaron cuatro escenarios, el primer caso consistió en la monoincineración de residuos sólidos municipales, el segundo caso en la monoincineración de lodos de depuradora, el tercer caso en la co-incineración de residuos municipales y lodos por medios tradicionales, el cuarto caso se basó en la co-incineración integrada de lodos y residuos municipales, cuyo resultado menciona que desde el punto de vista ambiental el mayor efecto en los cuatro casos son no carcinógenos, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad terrestre y potencial de calentamiento global, siendo el caso cuatro el que tiene el efecto más positivo de  $-1.44$  kg CO<sub>2</sub> eq sobre el cambio climático y  $-18$  MJ sobre los recursos; en cuanto a la eficiencia energética el cuarto caso mostro el mejor rendimiento ahorrando la energía renovable, ya que permitió el ahorro de 0.21 t de carbón por tonelada de materia prima, asimismo desde el punto de vista económico este caso es ventajoso reduciendo el 79.08 % de costo en carbón, mediante la obtención de los resultados mencionados se concluyó que la mezcla de lodos de depuradora y residuos municipales es un tratamiento efectivo para poder desarrollarlo (Chen et al., 2019).

Tabla 5: Aprovechamiento y tratamiento de lodos residuales.

		Beneficio	Desventaja	Ambiente
Aprovechamiento	Energía eléctrica mediante biogás	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera 25% de energía</li> <li>• Reduce 24 % del volumen de lodos</li> <li>• Reduce el 30% de costo al año</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de inversión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce emisión de GEI 0.0044%</li> </ul>
	Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contiene alto amonio</li> <li>• Bajo costo en inversión y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constante volteo del sustrato</li> <li>• No elimina el 100 % metales</li> <li>• Tiene que reaccionar con el suelo para después ser asimilado por las plantas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No tiene impacto al ambiente</li> </ul>
	Vermicompostaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor conservación del proceso</li> <li>• Rápida descomposición</li> <li>• Menor probabilidad de acidificación y salinización</li> <li>• No origina residuos dañinos</li> <li>• Mayor retención de agua</li> <li>• Mayor calidad del producto</li> <li>• mayor contenido de nutrientes y nitratos</li> <li>• Bajo costo en inversión y mantenimiento</li> <li>• Las plantas pueden asimilar de manera inmediata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere un adecuado medio para el desarrollo de las lombrices</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reemplaza a los fertilizantes inorgánicos</li> </ul>
Disposición final	Vertedero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No presenta beneficio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera lixiviados</li> <li>• Contaminación de agua subterránea</li> <li>• Mayor área de terreno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atracción de vectores</li> <li>• Genera enfermedades</li> <li>• Desprendimiento de gases tóxicos</li> </ul>
	Incineración	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de lodos</li> <li>• Generación de electricidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más uso de energía debido al alto contenido de humedad en los lodos</li> <li>• Generación de gases y cenizas peligrosas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de gases</li> </ul>

## CONCLUSIÓN

Finalmente se concluye que los lodos provenientes de la PTAR se pueden llegar a aprovechar mediante generación de energía eléctrica, compostaje y vermicompostaje, siendo este último el

más recomendable debido sus grandes benéficos en comparación con el compostaje, ya que mediante el uso de lombrices permite la acumulación del mayor porcentaje de metales pesados presentes en los lodos, generando así un producto “humus” de buena calidad, el cual permite reemplazar a los fertilizantes inorgánicos debido a su gran contenido de nutrientes siendo estos asimilados de manera inmediata por las plantas, asimismo se pueden aprovechar mediante la generación de energía eléctrica para satisfacer la demanda de energía requerida para la operación de la PTAR, sin embargo su principal desventaja se debe a que requiere un mayor costo de inversión pero a la larga trae ganancias económicas, de esta manera se puede evitar que se dispongan en botaderos o sean incinerados ocasionando la atracción de vectores y desprendimiento de gases, generando de esta manera el incremento de los GEI.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador-díaz, A., Veliz-lorenzo, E., & Bataller-venta, M. (2015). Tratamiento de lodos , generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 1–10. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- Asses, N., Farhat, A., Cherif, S., Hamdi, M., & Bouallagui, H. (2018). Comparative study of sewage sludge co-composting with olive mill wastes or green residues: Process monitoring and agriculture value of the resulting composts. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.006>
- Atiyeh, R. M., Subler, S., Edwards, C. A., Bachman, G., Metzger, J. D., & Shuster, W. (2000). *Effects of vermicompost and composts on plant growth in horticultural container media and soil*. 590, 579–590.
- Caballero, J., Jiménez, M. del C., García, C., Lucero, M., & Tello, A. (2019). Revalorización de lodos residuales: 2. Vermicompostaje. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Canadian Council of Ministers of the Enviroment. (2006). *Coordinated Science and Research on Municipal Wastewater Effluent (MWWE)*. (September).

- Chen, G., Wang, X., Li, J., Yan, B., Wang, Y., Wu, X., ... Ma, W. (2019). Science of the Total Environment Environmental , energy , and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge : A case study in China. *Science of the Total Environment*, 647, 1433–1443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.104>
- Cieslik, B. M., Namiessnik, J., & 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>
- COSUDE. (2017). Producción de compost a partir de lodos provenientes de PTARs.
- Cubillos, I. J. M. (2009). *Aprovechamiento De Lodos Primarios Provenientes Del Tratamiento De Aguas Residuales De Una Industria Láctea Por Medio De La Producción De Concentrados Para Animales Del Sector Porcícola Y Ganadero Vacuno*. 175.
- Cristina, M. (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades. *ICIDCA : Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(1), 13-21.
- Häder, D. P. (2017). Ecotoxicological monitoring of wastewater. En *Bioassays: Advanced Methods and Applications* (pp. 369-386). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811861-0.00018-8>
- Elvira, C., Sampedro, L., Benítez, E., & Nogales, R. (1998). Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot-scale study. *Bioresource Technology*, 63(3), 205–211. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00145-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00145-4)
- Feng, L., Luo, J., & Chen, Y. (2015). *Dilemma of Sewage Sludge Treatment and Disposal in China*. 4781–4782. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01455>
- Flandes, B., & Soto, J. (2017). *Comparación de distintos métodos de secado (3) para lodos, de la planta de tratamiento de aguas residuales de sn jerónimo, del municipio de purísima del rincón, gto. (3), 350–356. Recuperado de <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2314/1>*

- Gerba, C. P., & Pepper, I. L. (2015). Municipal Wastewater Treatment. En *Environmental Microbiology: Third Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00025-9>
- González, I. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*. Recuperado de <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13199/2016000001232.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Limón, J. (2013). *Tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?* 1–45. Recuperado de [http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf)
- Llivichuzca, M. (2016). *Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de huevos helmintos*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Lombardelli, G., Pirone, R., & Ruggeri, B. (2017). *LCA Analysis of Different MSW Treatment Approaches in the Light of Energy and Sustainability Perspectives*. 57, 469–474. <https://doi.org/10.3303/CET1757079>
- María, D., Martínez, A., Claudia, D., & Octaviano, A. (2018). *Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (G Y CEI) del sector aguas residuales de México*.
- Marín, D. (2019). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopo Cundamarca para la producción de un fertilizante organo-mineral (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L., & Thebo, A. (2015). Global wastewater and sludge production, treatment and use. In P. et al. Drechsel (Ed.), *Wastewater: Economic Asset in*

*an Urbanizing World* (Springer S). <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6>

Onofre, E. (2018). *Propuesta técnica de gestión ambiental sostenible para e aprovechamiento de lodos que provienen de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en campamentos mineros del Perú* (Pontifica Universidad Católica del Perú). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/13374>

Operaza, G. (2006). *Lodos residuales : estabilización y manejo*. (figura 1), 51–58. Recuperado de [http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006\\_Vol\\_1/Num\\_1/NO\\_Vol\\_I\\_21-30\\_2006.pdf](http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf)

Ospina, F., Rodríguez, A., & Gonzales, J. (2012). C omparación de la reglamentación para Comparison of the regulations for the management of sludge from waste water in Argentina , Chile and Colombia el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina , Chile y Colombia. *Revista UMNG*, 33(2), 227–238. Recuperado de <file:///C:/Users/hp/Downloads/Dialnet-ComparacionDeLaReglamentacionParaElManejoDeLodosPr-6285722.pdf>

Qian, L., Wang, S., Xu, D., Guo, Y., Tang, X., & Wang, L. (2016). Treatment of municipal sewage sludge in supercritical water: A review. *Water Research*, 89, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.047>

Pruden, A. (2018). Antibiotics and Antibiotic Resistance: Closing the Loop Between Hospitals and the Environment. En *Health Care and Environmental Contamination* (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 11, pp. 137-148). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63857-1.00008-5>

Rojas, R., & Mendoza, L. (2011). *El potencial de generación de energía eléctrica empleando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, Baja California*. 343–347. Recuperado de [http://www.redisa.uji.es/artSim2011/RecuperacionDeEnergiaAPartirDeResiduos/El-potencial-de-generación-de-energía-eléctrica-empleando-biosólidos-como-fuente-de-materia-prima\\_-El-caso-de-la-ciudad-de-Ensenada,-Baja-California..pdf](http://www.redisa.uji.es/artSim2011/RecuperacionDeEnergiaAPartirDeResiduos/El-potencial-de-generación-de-energía-eléctrica-empleando-biosólidos-como-fuente-de-materia-prima_-El-caso-de-la-ciudad-de-Ensenada,-Baja-California..pdf)

- Rojas, R., & Mendoza, L. G. (2012). Utilizacion de biosolidos para la recuperacion energetica en México. *Scielo*, 7(2), 74–94.
- Rossi Maria. (2010). *Opciones Tecnológicas Para El Tratamiento De Aguas Residuales*. Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/0605A78F2E41896205257DC800592EF0/\\$FILE/Oportunidades\\_Mejoras\\_Ambientales.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/0605A78F2E41896205257DC800592EF0/$FILE/Oportunidades_Mejoras_Ambientales.pdf)
- Ruiz, A., & Quevedo, L. (2017). Análisis de los Lodos Provenientes del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Guatavita. Universidad Católica de Colombia.
- Sagastume, D. (2019). *Aprovechamiento Energético de los Lodos Obtenidos a Partir del Tratamiento de Aguas Urbanas*. 1–35. Recuperado de [http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/140479/1/TFM\\_MERSE\\_David\\_Sagastume.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/140479/1/TFM_MERSE_David_Sagastume.pdf)
- Saturnino, G. (2016). *Tratamiento de aguas residuales*. 2, 433–439. Recuperado de <file:///C:/Users/hp/Desktop/biblio para revisión torica/112.pdf>
- Scott, R. (2013). Fate and behaviour of parasites in wastewater treatment systems. En *Handbook of Water and Wastewater Microbiology* (pp. 491-521). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-470100-7.50032-7>
- Sharma, D., & Yadav, K. D. (2017). *Malaysian Journal of Sustainable Agriculture ( MJSA ) Vermicomposting of Flower Waste : Optimization of Maturity Parameter by Response Surface Methodology*. 1(1), 15–18.
- Yaqout, A. (2003). Assessment and analysis of industrial liquid waste and sludge disposal at unlined landfill sites in arid climate. *Waste Management*, 23(9), 817–824. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00036-9)