

Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones

Anisley Amador-Díaz, Eliet Veliz-Lorenzo, Mayra Bataller-Venta

Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Ave 25 No.15202 Esq.21-A Cubanacán, Playa, La Habana, Apartado Postal 6414, La Habana, Cuba. anisley.amador@cnic.edu.cu

Recibido: 18 de mayo de 2014. Aceptado: 25 de noviembre de 2014.

Palabras clave: lodos, caracterización, reuso, tecnología de tratamiento, ozonización.
Key words: sludge, characterization, reuse, treatment technology, ozonation.

RESUMEN. Se plantea la problemática relacionada con la contaminación de los lodos sin tratar, debido a los volúmenes de estos residuos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos afectan al medio ambiente, por su contenido de materia orgánica, microorganismos y metales pesados. El objetivo del trabajo es realizar una valoración sobre las normativas existentes para el manejo de los mismos o su aplicación en los suelos y los procesos tecnológicos de tratamiento que se aplican para disminuir su impacto ambiental. Las normas vigentes para el manejo y reuso adecuado de los lodos, establecen un estricto control sobre los metales pesados y la contaminación microbiológica. Los procesos tecnológicos de tratamientos empleados pueden ser físicos (como la centrifugación, filtración y secado), químicos (que comprenden la estabilización con cal, el acondicionamiento y la desinfección química), o biológicos (como la digestión anaerobia y aerobia). Entre estos los más empleados para la estabilización de los lodos son los biológicos, seguidos de la deshidratación de los lodos mediante su secado. De igual forma, se reconoce que existen otras tecnologías disponibles como la ozonización, la cual permite obtener eficiencias de reducción de los parámetros indicadores de contaminación físico-químico y microbiológico entre un 31 y 99,99%, así como un 90% de su volumen.

ABSTRACT. The problems associated with contamination of untreated sludge, due to the volumes of these wastes generated in wastewater treatment plants, are described. These affect the environment due to its content of organic matter, microorganisms and heavy metals. The aim of this work is to perform a review of existing regulations for the management of sludge or to make possible its application in soils and the treatment technological processes that are applied to reduce its environmental impact. The current standards for the proper management and reuse of sludge, establish strict control over heavy metals and microbiological contamination. The technological processes employed can be physical (such as centrifugation, filtration and drying), chemical (which include lime stabilization, conditioning and chemical disinfection) or biological (such as anaerobic and aerobic digestion). Among these, the most used are the biological ones followed by dehydration of sludge by drying. Similarly, it is recognized that there are other available technological such as ozonation, which allows to obtain reduction efficiency of the indicators of physical-chemical and microbiological pollution between 31 and 99, 99 %, as well as 90 % of volume.

INTRODUCCIÓN

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son el producto de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente, o de la formación de nuevos sólidos suspendidos resultantes de los sólidos disueltos.¹⁻³ Estos lodos o biosólidos son subproductos líquidos, sólidos o semisólidos generados durante los procesos mecánicos, biológicos y químicos de purificación de las aguas servidas en las PTAR.⁴⁻⁶ Contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micro nutrientes, metales pesados y agua. Están formados principalmente por agentes contaminantes, debido a la acumulación de materias en suspensión y compuestos orgánicos en las condiciones de tratamiento.^{2,7}

Diariamente, se generan volúmenes de estos residuos en las PTAR, con una carga de microorganismos patógenos, que constituyen un riesgo para la salud.¹ Debido a las exigencias en depuración de las aguas residuales, para

garantizar el cumplimiento de las regulaciones y normativas nacionales e internacionales, estas son sometidas a tratamientos más rigurosos, con el objetivo de remover sus contaminantes, por tanto la contaminación de los lodos tiende a un incremento. Las características del lodo obtenido están condicionadas por el origen de las aguas residuales, el proceso de tratamiento de las y la época del año.

El incremento de la producción de lodos como resultado de la existencia de un mayor número de plantas depuradoras dotadas de tratamientos secundarios y terciarios, se están agotando las actuales vías de evacuación y tratamiento de lodos.⁸ Esto está derivando en la búsqueda de procesos más eficientes para su tratamiento, disposición y reutilización. Lo anterior, ha generado una problemática debido al vertido de lodos, puede originar severos problemas de contaminación. Por otro lado, se están desperdiciando las propiedades beneficiosas de los lodos que pudieran ser aprovechadas en la agricultura o en el mejoramiento de los suelos, ya que contienen componentes valiosos, como materia orgánica y nutrientes.⁴⁻⁶ La evacuación final de los lodos es un problema complejo. El objetivo del presente trabajo consistió en realizar una valoración sobre las normativas existentes para el manejo de los lodos o hacer posible su aplicación en los suelos y los procesos tecnológicos de tratamiento que se aplican con vistas a disminuir su impacto ambiental.

PROCEDENCIA DE LOS LODOS

Los lodos provenientes de las PTAR presentan diferentes composiciones en relación con la procedencia de las aguas. Estos pueden ser generados durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas o de las aguas industriales.⁹ Además, las características de los lodos están estrechamente vinculadas al proceso empleado en las PTAR, que influirá en las características y propiedades de los biosólidos y la viabilidad de la alternativa a emplear en la gestión.⁹

Lodos provenientes de tratamientos biológicos

Los lodos de las PTAR son el resultado de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente (lodos primarios) o de la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) resultantes de los sólidos disueltos.³ Los tratamientos de las PTAR pueden ser sin digestión, basado en procedimientos de separación física, secundarios con digestión, que comprenden procedimientos físicos y biológicos, en los cuales se reduce la presencia de patógenos, parásitos y el contenido de compuestos carbonados, a los cuales se suman los tratamientos químicos.⁹ Por tanto, la calidad de los lodos, en cuanto a su nivel de estabilización, está determinada en gran medida por el régimen de tratamiento al que son sometidos.

El proceso de lodos activados incluye su crecimiento y desarrollo en el tanque de aireación, su posterior paso al tanque de sedimentación y su recirculación al tanque de aireación, proceso que se repite en reiteradas ocasiones hasta el momento que estos son purgados y eliminados del sistema.¹⁰ Entre sus características presentan un color marrón y una apariencia floculenta, y si no ha comenzado a degradarse, tiene un olor a tierra húmeda.¹¹

La fracción de lodo generado en los tratamientos biológicos de las PTAR está compuesta principalmente por microorganismos, y una parte del lodo está compuesto por materia sólida.¹¹ Pueden presentar un color marrón o marrón oscuro, si es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico, si es más claro de lo normal puede estar poco aireado. También pueden adquirir una apariencia, poco olor. Se deshidratan fácilmente en áreas de secado, o adquieren un color marrón oscuro-negro su olor es relativamente débil.¹²

Lodos provenientes de tratamiento físico - químicos

La aplicación del tratamiento físico químico a los lodos a principios del siglo veinte era muy difundida, pero las elevadas dosis de coagulantes utilizadas, generaban una gran cantidad de lodos, por lo que empezaron a ser desplazados por tratamientos biológicos, que originan menos lodos y tienen una mejor eficiencia en términos de remoción de contaminantes.¹³

Actualmente, el tratamiento físico químico utiliza menores dosis de coagulantes, acompañado en ocasiones con una mínima dosis de polímeros, lo que implica bajos costos de operación y un ligero aumento en la cantidad de lodos generados respecto a los tratamientos convencionales.¹³

Con el uso del hidróxido de sodio se produce un lodo de color café para dosis bajas de coagulante y de color blanco para dosis elevadas. El flóculo formado sedimenta a gran velocidad en los primeros diez minutos. El lodo generado tiene un aspecto homogéneo.¹³ El sulfato de aluminio disuelto en agua produce hidróxido de aluminio, que provoca la formación de flóculos de forma prácticamente instantánea. El flóculo formado sedimenta con bastante facilidad y rapidez. Al usar este coagulante se genera un lodo de color oscuro.^{13,14}

El lodo generado, al usar el cloruro férrico, adquiere un color café claro para dosis menores de 40 mg/L, entre 40 mg/L y 100 mg/L el color se hace cada vez más oscuro y para dosis superiores a 100 mg/L presenta un color rojizo. El flóculo presenta buena sedimentación y se asienta generando capas bien diferenciadas.¹³

El policloruro de aluminio (PAC) presenta diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas, los flóculos forman grupos de pequeñas esferas o estructuras tipo cadena o ambas. Esta diferencia estructural produce una menor turbidez en las aguas.^{15,16} El sulfato férrico se usa como coagulante inorgánico para retirar del agua por coagulación y

floculación, las partículas suspendidas coloidales. Se prepara por medio de sulfato ferroso como agente oxidante o por óxido férrico disolvente en ácido sulfúrico.¹⁷

CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS

La caracterización de los lodos es la clave para cuantificar las concentraciones de nutrientes para su aplicación en los suelos y de los compuestos dañinos que deben ser eliminados. Para el adecuado manejo de lodos se debe evaluar la composición química (incluida la concentración de metales pesados), así como el contenido de patógenos y parásitos que posean.

Para la determinación de las demandas química y bioquímica de oxígeno DQO y DBO se utilizan técnicas espectrofotométricas, mientras que para los sólidos se utiliza el método gravimétrico o el volumétrico. En el caso del nitrógeno total se emplea el método de Kjeldahl y para determinar el fósforo total el de cloruro de estaño. Los metales pesados se analizan mediante absorción atómica. Todas las técnicas que se pueden utilizar se encuentran descritas.

Según estudios realizados, se ha establecido un grupo de indicadores que debe ser cuantificado, ya que establece el grado de contaminación que presentan los lodos. Existe un intervalo de valores para cada uno de esos indicadores (Tabla 1) información que permite realizar una adecuada elección de los procesos de tratamiento, desde el punto de vista económico y medioambiental, con el objetivo de permitir su reúso o disposición segura.¹⁸⁻²⁰

Tabla 1. Valores característicos de los parámetros más frecuentemente estudiados en los lodos¹⁹

Indicadores	Máximo	Mínimo
DQO total (mg/L)	90000	6000
DBO total (mg/L)	30000	2000
Nitrógeno total (mg/L)	1500	200
Fósforo total (mg/L)	300	40
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	100000	7000
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	60000	4000
pH	8,5	7,0
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	10 ⁸	10 ⁶

NMP Número más probable. DQO Demanda química de oxígeno. DBO Demanda Bioquímica de oxígeno.

Otro indicador que debe valorarse en la caracterización de los lodos es el contenido de metales pesados, los cuales están representados por un grupo de elementos químicos que poseen una elevada toxicidad para los seres vivos, aunque se presentan en concentraciones permisibles en los lodos para su manejo de forma segura (Tabla 2).²¹

Tabla 2. Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos²¹

Metal	Concentración (mg/kg de lodo seco)
Cadmio	20-40
Cobre	1000-1750
Níquel	300-400
Plomo	750-1200
Zinc	2500-4000
Mercurio	16-25
Cromo	1000-1500
Arsénico	20-40
Selenio	50-100
Molibdeno	10-25

NORMAS PARA LA GESTIÓN DE LOS LODOS

En la mayoría de los casos, los lodos generados son descargados al drenaje o son desechados sin ningún tipo de tratamiento previo en presas, o terrenos y en menor medida son dispuestos en lagunas y rellenos sanitarios. Aparentemente, la causa de esta situación es la falta de recursos para llevar a cabo el tratamiento de los lodos, aunque adicionalmente no existen suficientes normativas que controlen su reutilización de forma favorable.

La norma oficial mexicana, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos para su aprovechamiento y disposición.²² En ella los biosólidos (conocidos también como fangos o lodos) se clasifican en:

excelentes y buenos en función de su contenido de metales pesados (Tabla 3) y en clases A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos (Tabla 4).²² El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase (Tabla 5.)²²

La norma de la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) es más específica respecto a los lodos y los clasifica en dos clases. Clase A: lodos sin restricciones sanitarias para su aplicación en el suelo, denominados Biosólidos de Calidad Excepcional, los cuales son poco contaminantes y han sido tratados para eliminar esencialmente el contenido de patógenos.²³ Clase B: lodos aptos para la aplicación en el suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos. Asimismo, los denomina como aquellos biosólidos con bajos límites de concentración de contaminantes, pero de menor calidad que los lodos Clase A.²³

Tabla 3. Concentraciones límites máximas permisibles de metales pesados en los lodos según la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002²²

Metales	Excelentes (mg/kg en base seca)	Buenos (mg/kg en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Tabla 4. Concentraciones límites máximas permisibles de patógenos y parásitos en los lodos según la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002²²

Clase	Indicador Bacteriológico de Contaminación		Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g en base seca)		Salmonella spp (NMP/g en base seca)	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1000		Menor de 3	Menor de 1 ^(a)
B	Menor de 1000		Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000		Menor de 300	Menor de 35

^(a) Huevos de helmintos viables. NMP Número más probable.

Tabla 5. Aprovechamiento de biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para las clases B y C
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación • Los establecidos para la clase C
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramiento de suelos • Usos agrícolas

Según estudios realizados, existen indicadores de calidad de los lodos que son regulados por las normas internacionales y deben ser atendidos para que puedan ser utilizados de forma favorable en los suelos por su

contenido de nutrientes tales como fósforo y nitrógeno, lo que puede variar en dependencia del clima y de las características donde van a ser aplicados (Tabla 6).^{18,24,25} En Cuba, no se conocen normas que regulen el vertimiento y reúso de los lodos, por lo que es necesario utilizar como referencia para su posible aplicación, las empleadas en otros países (Tabla 6).

Tabla 6. Concentraciones límites de metales pesados en los lodos en diferentes países (mg/kg en base seca)¹⁸

Contaminante	Bélgica	Canadá	Alemania	Italia	España	EE.UU.
Zinc	1000	500	400	400	4000	2800
Plomo	600	150	150	200	1200	300
Cadmio	5	3	1	3	40	21
Cromo	150	50	100	150	750	–
Cobre	100	60	100	200	1750	1500
Níquel	50	60	50	50	400	420
Mercurio	5	0,15	1	2	25	17

Por otra parte, existen diferencias entre las normas establecidas por la Directiva Europea y la norma de la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) con respecto al contenido de metales pesados que deben presentar los lodos para su utilización (Tabla 7). La Directiva Europea considera un mayor intervalo para utilizarlos de forma segura y sin causar daños nocivos a los suelos, los cultivos y a las personas que van a manipularlos.²⁴ La USEPA indica valores más precisos en cuanto a las características que deben presentar y para algunos indicadores es más estricta como en los casos del zinc, plomo, arsénico y mercurio (Tabla 7). En muchos países existen diferentes regulaciones para el reúso de los lodos; así, por ejemplo, en agricultura son diversas las exigencias, en dependencia del tipo de cultivo, hábito de crecimiento, periodo vegetativo, forma de consumo. Para otros usos varían las normativas.^{24,25} Es conveniente tener presente el pH para el manejo seguro de los lodos, ya que puede inferir en la solubilidad de los metales y por tanto, su movilidad, incrementando el efecto de la toxicidad con un impacto negativo para los suelos. Para $pH < 7$ existen mayores riesgos de movilidad de los metales pesados, por tanto, deben presentar límites admisibles inferiores para su aplicación.²¹

Tabla 7. Concentraciones límites de metales pesados (mg/kg en base seca) en los lodos en diferentes organizaciones normativas (Directiva Europea y USEPA)²⁴

Metales	Directiva Europea 278/86	USEPA 503
Zinc (mg/kg)	2500-4000	2800
Plomo	750-1200	300
Cadmio	20-40	39
Arsénico	No normado	41
Cobre	1000-1750	1500
Níquel	300-400	420
Mercurio	16-25	17

Daños ocasionados por la toxicidad de los metales pesados

Se ha evaluado que los lodos después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento, siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de metales pesados establecidos en las normas, al ser considerados como residuos no peligrosos.²² No obstante, existe un grupo de metales que se encuentran entre los más tóxicos, como el cadmio, el cromo, el mercurio y el arsénico, los cuales requieren una especial atención con respecto a su contenido en los lodos, ya que si no son controlados debidamente en ellos, pueden provocar problemas de anemia y crecimiento retardado.²⁶ Además, alergia en la piel, daños en el cerebro, en los riñones y en los pulmones.^{27,28}

ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTOS DE LODOS GENERADOS EN LAS PTAR

Los objetivos del tratamiento de lodos están dirigidos a lograr su estabilización para garantizar una degradación controlada de las sustancias orgánicas que contienen, y eliminar el olor, disminuir el volumen e inactivar organismos patogénicos para su posible utilización posterior o disposición final (Tabla 8).¹²

Tabla 8. Tratamientos y métodos empleados en los lodos¹²

Tratamiento	Métodos empleados
Operaciones previas	Bombeo, trituración, desarenado, homogeneización
Espesamiento	Gravedad, flotación, centrifugación, filtros de bandas
Estabilización	cal, tratamiento térmico, digestión anaerobia y aerobia
Deshidratación	filtraciones, centrifugación, secado
Desinfección	pasteurización, química, almacenamiento de larga duración
Acondicionamiento	Químico, térmico
Secado térmico	En Hornos, incineración, evaporadores múltiples
Compostaje	Biológico aerobio

Con el espesamiento se logra una disminución de volumen, del lodo de alrededor de un 30 % a un 80 %, teniendo lugar directamente en el tanque de almacenamiento. Esto puede ser beneficioso para tratamientos posteriores tales como la estabilización y desinfección, ya que se necesitaría menos espacio para estas operaciones.^{2,29,30}

La estabilización aeróbica se puede realizar simultáneamente en plantas de lodos activos donde los lodos, tanto primarios como secundarios, son continuamente aireados durante largos periodos de tiempo. La estabilización química de los lodos es la oxidación húmeda y estabilización térmica bajo condiciones de temperatura y presión elevadas, con lo que se alcanza una disminución del 30 % al 35% de los sólidos suspendidos, así como reducir la presencia de patógenos y olores desagradables.^{29,30}

El acondicionamiento de los lodos permite liberar la mayor cantidad de agua posible de sus partículas para mejorar la eficiencia del proceso de deshidratación. El objetivo de este tratamiento es facilitar la aglomeración de sólidos.³⁰ Antes de ejecutar el proceso de deshidratación, el líquido de los lodos debe drenarse, lo que permite obtener un lodo seco y poroso. Es necesario tener en cuenta las condiciones limitantes como: cantidad, estructura, disposición, regulaciones, disponibilidad y personal.^{29,31} Este proceso puede considerarse útil, si se realiza posterior a la estabilización, con el objetivo de facilitar el manejo de los lodos.

Mediante el secado térmico de los lodos es posible reducir su peso y eliminar organismos patógenos. El secado se realiza mediante la evaporación del agua que existe en los lodos por calentamiento en hornos, incineración y exposición al sol, los cuales son los métodos más utilizados.³⁰

La desinfección es la última etapa de tratamiento empleada para eliminar los organismos patógenos, lo que ha adquirido una gran importancia debido a las restrictivas normas que existen para garantizar la protección de la salud. Según algunos autores, los medios más adecuados para desinfectar los lodos son: la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo.³²

En las PTAR en Cuba el proceso más comúnmente empleado para la estabilización de los lodos es la digestión anaerobia y la deshidratación de los lechos de secado.³³

Eficiencia de los tratamientos en la reducción de la carga contaminante

Existen reportes del efecto de diferentes procesos tecnológicos de tratamiento sobre los lodos (Tabla 9).³⁰ Es criterio, que la selección de una tecnología destinada a tales efectos debe realizarse sobre la base de los volúmenes a tratar y la eficiencia de reducción de los indicadores de contaminación de los lodos. Se considera más eficiente implementar un sistema de tratamiento para garantizar una mayor descontaminación.

Tabla 9. Efecto y definición de los tratamientos de lodos residuales³⁰

Tratamiento	Definición	Efecto en los lodos
Sedimentación	Separación suave de agua y sólidos mediante gravedad, flotación o centrifugación	Concentra los sólidos mediante la remoción de agua
Digestión	Estabilización biológica a través de la conversión de la materia orgánica en CO ₂ , agua y metano	Reduce patógenos y materia biodegradable
Estabilización alcalina	Estabilización mediante la adición de materiales alcalinos (cal).	Disminuye la actividad biológica.

Acondicionamiento	Proceso que causa la coagulación de los sólidos para favorecer en la deshidratación	Facilita la aglomeración de los sólidos
Deshidratación	Separación fuerte del agua y los sólidos	Facilita el manejo de los lodos
Compostaje	Estabilización biológica aeróbica, termofílica en un montículo	Disminuye la actividad biológica
Calentamiento	El calor termina de eliminar los organismos patógenos y elimina la humedad residual	Desinfecta los lodos y destruye organismos patógenos

Después de realizar una operación de sedimentación se obtiene un lodo más concentrado, al cual se le puede aplicar posteriormente un tratamiento que presente una adecuada eficiencia como la digestión aerobia y anaerobia. Mediante ellos se logra una estabilización de los lodos como consecuencia de la disminución de patógenos. Además de la reducción de los sólidos, debido a su transformación en dióxido de carbono y agua, como resultado de la mineralización. Se ha comprobado que la digestión anaerobia de los lodos es una opción tecnológica adecuada, con potencialidad para la obtención de biogás y la posible valorización del lodo para su reúso en la agricultura.¹⁴ Como desventaja presenta los largos periodos de tiempo que necesita para lograr lo anteriormente planteado.

La estabilización alcalina se basa en el aumento del pH para disminuir la concentración de organismos patógenos, así como de malos olores en los lodos, convirtiéndose en un proceso que pudiera desempeñar un papel importante en un sistema de tratamiento, debido a que existen parámetros de contaminación físico químico que son necesarios disminuir.

Tanto el proceso de acondicionamiento de los lodos, como su deshidratación pueden constituir tratamientos útiles para concentrar el contenido de sólidos y facilitar su manejo. Si son ejecutados de modo posterior al calentamiento o el compostaje que tienen como objetivo la disminución de la actividad biológica.

Para elegir el tratamiento más adecuado hay que tener en cuenta la compatibilidad medioambiental y la flexibilidad del método en relación con las cantidades y características variables de los lodos. La disposición de recursos desde el punto de vista económico y el área necesaria para el montaje de la tecnología, también deben ser considerados.

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE LOS LODOS POR OZONIZACIÓN

Otra alternativa de tratamiento es el empleo de la oxidación mediante un oxidante fuerte. El ozono es un agente oxidante muy poderoso.³⁴ Por lo que puede ser utilizado como reactivo químico para la oxidación de un gran número de sustancias orgánicas y para el tratamiento de mezclas de compuestos, orgánicos para aumentar su biodegradabilidad.^{7,35} Debido a sus características, el ozono es muy efectivo en la reducción o eliminación del color y el olor, así como en la mejora de la eficiencia de varias etapas de tratamiento de aguas y lodos residuales.³⁴ Permite que gérmenes muy resistentes sean inactivados con relativa facilidad tales como: virus, Legionella, *Pseudomonas aeruginosa*, *Entamoeba histolytica*, quistes de Giardia y *Cryptosporidium parvum*, Mycobacterium.

Un estudio realizado en cuatro tipos de lodos tratados por ozonización arrojó que la DQO solubilizada resultó proporcional a la cantidad de ozono transferido. En este sentido, el rendimiento de la solubilización por el ozono, se encontró que era similar para diferentes lodos de prueba.³⁵ La ozonización puede ser aplicada en el tratamiento de los lodos líquidos que salen de los sedimentadores y antes de su digestión. Se utiliza también en los lodos que se obtienen en los tratamientos biológicos.³⁵⁻³⁷

Para reducir el volumen de lodo, se consideran diversos factores como la naturaleza y la concentración de las diferentes materias oxidables presentes en el lodo, las dosis de ozono, la presencia o no de compuestos orgánicos biodegradables y la eficiencia de transferencia gas-líquido del ozono.^{7,35}

Efecto de la ozonización de los lodos

La efectividad de la ozonización en los lodos (Tabla 10), fue corroborada en estudios preliminares realizados en procesos de coagulación-floculación-sedimentación para el tratamiento de aguas municipales.³⁸ Después de la etapa de sedimentación, se obtuvieron como promedio 24 mL de lodo/L del agua residual.

Tabla 10. Eficiencias promedio de reducciones (%) de los indicadores evaluados en cuatro dosis de ozono aplicadas a los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales municipales

Indicadores	Dosis de ozono aplicadas(g/L)			
	2,6	4,0	5,3	8,0
DQO	64,6	69,3	62,5	70,5
Turbidez	72,1	77,5	69,4	78,2
Color	78,9	85,0	76,0	85,7
Coliformes fecales	99,9	99,9	99,9	99,9
Fósforo total	31,5	44,2	36,3	51,3
Nitrógeno total	39,4	61,1	58,1	65,6
ST	48,9	70,0	55,4	68,1
STF	66,6	73,0	59,4	70,5
STV	58,1	68,7	53,8	67,2
SST	66,0	75,8	63,7	77,5
SSF	68,4	79,5	63,0	76,0
SSV	65,2	74,5	64,0	78,0
SDT	50,3	58,7	39,5	50,6
SDF	64,3	63,2	54,2	62,5
SDV	43,3	56,5	32,1	44,5
SS	90,5	93,2	90,4	94,3

ST: Sólidos Totales. STF: Sólidos Totales Fijos STV: Sólidos Totales Volátiles

SST: Sólidos Suspendidos Totales, SSF: Sólidos Suspendidos Fijos, SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles SDT: Sólidos Disueltos Totales, SDF: Sólidos Disueltos Fijos, SDV: Sólidos Disueltos Volátiles, SS: Sólidos Sedimentables

Se apreció que los valores promedio de reducción de los indicadores medidos como turbidez, color y DQO se encontraban entre un 62 % y un 86 %, mientras el fósforo total se redujo entre un 30 % y un 52 %, y el nitrógeno total un 39 % y un 65 % respectivamente, quedando disponible entre un contenido de nutrientes para suministrarle a los suelos si se propone la aplicación de los lodos tratados.

En los coliformes fecales se presentaron resultados que alcanzaron hasta 99,9 % de eficiencia de inactivación. La eficiencia de reducción de los sólidos, se encuentra ubicó un 30 % y 95 %, los cuales fueron considerados como significativos en la disminución de dichos indicadores. Otros reportes destacan que con el empleo de la ozonización, se logra un 80 % de remoción de sólidos en lodos residuales.^{7,35}

En la (Tabla 9) se pudo observar que con la utilización de la dosis de ozono más baja de 2,6 g/L durante una hora de tratamiento se logra una adecuada eficiencia de reducción de materia orgánica, si se tienen en cuenta las reducciones del 64,6 % de DQO y del 43,3 % de los SDV, lo que resulta importante en la estabilización de los lodos. Estudios reportados destacan que cuando se mineralizan sustancias orgánicas en los lodos, del 60 % al 70 % del contenido de materia es transformado en CO₂, oxígeno, y nitrógeno libre. Además, mediante la disminución de la DQO se verifica el proceso de estabilización de los lodos, con el uso de la ozonización de lodos provenientes de tratamientos biológicos, se logra una reducción entre un 30 % y 70 % en los lodos residuales.³⁷ Estos resultados muestran similitud con los obtenidos en el Departamento de Tecnología de Tratamiento con Ozono.

La reducción de los volúmenes de lodos, se pudo apreciar a través de la eficiencia de reducción en el contenido de sólidos sedimentables que alcanzó un 90,5 %, la cual implicó una disminución de 845 mL/L con la menor dosis de ozono aplicada (2,6 g/L), lo que puede tener una incidencia importante a una mayor escala de generación de lodos.

En el estudio realizado los metales como el zinc, cadmio, plomo, arsénico, cobre, níquel y mercurio que resultan marcadamente tóxicos, se encuentran presentes en proporciones que no representan un peligro para cualquier forma de vida vegetal o animal. En este sentido, investigaciones sobre la eficiencia de la ozonización en la eliminación de metales disueltos y totales en los sedimentos de la fase líquida, que alcanzan valores de un (84 ± 17) % y un (84 ± 7) %, respectivamente.³⁹ Por lo tanto, la eficacia promedio de eliminación de metales disueltos y totales es de un 84 %.³⁹ Estos resultados demuestran la efectividad de la ozonización en la eliminación de metales.

CONCLUSIONES

Las normativas más empleadas en la agricultura son las de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y la Directiva Europea, aunque varios países disponen de normas propias que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos para su disposición y aprovechamiento, en dependencia del clima, usos y características del terreno donde serán aplicados. En general, se regula fundamentalmente el contenido

de metales pesados, organismos patógenos y parásitos: En Cuba, no se han identificado normas que regulen el vertimiento y reúso de los lodos.

Las tecnologías de tratamiento para lodos más utilizadas son los tratamientos biológicos como la digestión anaerobia, la estabilización y el compostaje, además de procesos físicos como el espesamiento, deshidratación y secado térmico.

La ozonización es una opción de tratamiento viable para los lodos, que reduce la materia orgánica y la contaminación microbiológica, por lo que se logra una adecuada estabilización y desinfección. Además, se elimina alrededor de un 90 % de los volúmenes, en reducidos tiempos de tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cartwright P. Tratamiento y reúso del agua en aplicaciones comerciales e industriales. *Revista Agua Latinoamérica*. 2009; 9 (1): 20-24.
2. WikiLibros. Ingeniería de aguas residuales. Destino final de fangos. 2010. [Consultado: 23 de febrero de 2014]. Disponible en: <http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier.htm>
3. Morales R, Mariel P. Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento. [Tesis en opción del título de Ingeniería Química con área en Ingeniería Ambiental]. Puebla, Universidad de Las Américas; 2005.
4. Marimbo C, Ortega R. Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas en la producción de cultivos en Chile. *Revista Agronomía y Forestal UC*. 2003; 5(20): 20-23.
5. Cuevas BJ, Seguel SO, Ellies SA, Dörner FJ. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. *Rev Cien Suelo Nutr Veg*. 2006; 6(2):1-12.
6. Barrios JA, Rodríguez A, González A, Jiménez B, Maya C. Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos físico químico por vía ácida. *Memorias XII Congreso Nacional FEMISCA-AIDIS*, Morelia, México, 2000.
7. Paul E, Salhi M. *Reduction of Excess Sludge Production: An Evolution of Combined Processes, Leading Edge Water and Wastewater Treatment Technologies*. Noordwijk/Amsterdam, The Netherlands; IWA Leading Edge Conference Series, Interamericana de España, S.A. Aravaca, May 26-28, 2003.
8. Corbitt, RA. *Manual de la Ingeniería Ambiental*. Editorial McGraw-Hill: 2003.
9. Lavado R, Taboada M. Factibilidad de valorización agrícola de biosólidos de plantas depuradoras. *Manual de procedimientos para la aplicación en el campo*. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina: 2002.
10. Cisterna P, Alvarado V. Gradientes de estabilización de lodos de acuerdo a los regímenes de procesos de fangos activos. *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Universidad de Oviedo, España, 2003.
11. Metcalf y Eddy. *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Editorial McGraw-Hill: Interamericana de España, S.A. Aravaca, 2003.
12. Bonilla LA. Diagrama de los Procesos de Tratamiento de Fango. 2002 [Consultado: 23 de febrero de 2014]. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/99501039/fangos>
13. Carrasco CA. Tratamiento físico químico de aguas residuales. [Tesis en opción del título de Ingeniero Civil]. Universidad de Chile, abril, 2007.
14. López M, Véliz E, Fernández L A, Espinosa MC. Tratamiento de lodos. Una etapa necesaria dentro del proceso tecnológico. *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 2010; 41: 1-6.
15. Sinha S, Yoon Y, Amy G, Yoon J. Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. *Chemosphere*. 2004; 57(9):1115-1122.
16. Cogollo JM. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso de hidroxiclорuro de aluminio. *Dyna*. 2011; 78(165):18-27.
17. NCh3098.c2007. Sulfato férrico para tratamiento del agua Requisitos y métodos de análisis. República de Chile. Proyecto de norma de la división de normas del Instituto Nacional de Normalización. Miembro de la Organización Internacional de Normalización (ISO) y de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (CONPAT).
18. López M, Espinosa MC, Martínez V, Ramos C, Pellón A. Desarrollo y tendencias en la gestión de los residuos sólidos urbanos. *Monografía. Registro CENDA*. Ciudad de La Habana: 2003: p.183.
19. Henze M, Loosdrecht van MC, Ekama GA, Brdjanovic D. *Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design*. London, UK: Published by IWA Publishing; 2008: p.34-52.
20. Oropeza N. Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*. 2006; (1): 51-58.
21. Lorenzo C. Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos. *Spin Cero*. 2003; 98:57-78.

22. Norma Oficial Mexicana (NOM)-004-SEMARNAT: 2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
23. USEPA: 1993. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. 40 CFR Parts 257, 403 and 503, U.S. Environmental Protection Agency.
24. Rámila JI, Rojas SI. Alternativa de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua. [Tesis en opción del título Ingeniero Comercial, Mención Administración]. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Economía y Negocios; 2008.
25. Prieto F, Lucho CA, Poggi H, Acevedo O, Barrado E. Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos traza en suelos de la región Actopan–Ixmiquilpan del Distrito de Riego 03, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Ciencia Ergo Sum*. 2007; 14: 69-80.
26. Tahri M, Benyaïch F, Bounakhla M. Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). *Environmental Monitoring Assessment*. 2005; 102(1-3): 405-417.
27. Malla R, Tanaka Y, Mori KL. Effect of short-term sewage irrigation on chemical build up in soils and vegetables. *The Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. Manuscript LW 07 006. 2007; 9(1):1-14.
28. Lenntech. Water Treatment Solutions. [Consultado: 30 de octubre de 2013]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/tratamiento-lodos>
29. Araque MP. Evaluación de los tratamientos térmicos y alcalinos en la desinfección del lodo generado en la PTAR el Salitre. [Tesis en opción del título de magíster en Ingeniería Civil]. Bogota D.C: Universidad de los Andes; 2006.
30. Fioravanti MT, Vega N. Eficiencia de los microorganismos eficaces en la estabilización de lodos sépticos para su reuso agrícola. [Tesis en opción del título de Ingeniero (a) Agrónomo (a) con el grado de Licenciatura]. Costa Rica; diciembre; 2003.
31. Burchard LP. Manejo de Lodos. Secretaría Regional Ministerial de Salud de Antofagasta. 2010 [Consultado: 14 de noviembre de 2013]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/lucasburchard/manejo-de-lodos>
32. Olalde E. Dimensionamiento de un reactor para el tratamiento de lodos residuales secundarios pretratados. [Tesis en opción del título de Maestro en Ingeniería Civil]. México D.F. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura; septiembre; 2009.
33. Menéndez C, Pérez J, y García JA. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales mediante filtros percoladores. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría: 2005.
34. Ikehata K, Naghashkar NJ, Gamal El-Din M. Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review. *Ozone Science & Engineering*. 2007; 28(6): 353-414.
35. Paul E, Debellefontaine H. Reduction of Excess Sludge Produced by Biological Treatment Processes: Effect of Ozonation on Biomass and on Sludge. *Ozone Science & Engineering*. 2007; 29(6): 415-427.
36. Saktaywin W, Tsuno H, Nagare H, Soyama T. Operation of a new sewage treatment process with technologies of excess sludge reduction and phosphorus recovery. *Water Science & Technology*. 2006; 53(12): 217-227.
37. Fabiyi M, Novak R, Ried A, Weiland A, Capra R, Sandon A. Sludge reduction using ozone induced lysis. In memory of World Congress on Ozone and Ultraviolet Technologies; Los Angeles, 2007.
38. Véliz E, Llanes JG, Fernández L A, Bataller M. Reuso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 2009; 40(1):35-44.
39. Lage Filho FA, Carvalho LRF, Lopes MLA. Ozonation of sediments from an urban lake: an exploratory investigation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2011; 28(3): 403-414.