

## Análisis de parámetros fisicoquímicos en un reactor biológico en el tratamiento de lodos de lixiviado provenientes del Relleno Sanitario Doña Juana\*

Álvaro Chávez Porras\*\*✉  
Luis Felipe Pinzón Uribe\*\*\*  
Nicolás Casallas Ortega\*\*\*\*

**Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artículo:** Chávez, Á., Pinzón, L. y Casallas, N. (2017). Análisis de parámetros fisicoquímicos en un reactor biológico en el tratamiento de lodos de lixiviado provenientes del Relleno Sanitario Doña Juana. *Revista UNIMAR*, 35(2), 211-219.

**Fecha de recepción:** 26 de octubre de 2016

**Fecha de revisión:** 02 de febrero de 2017

**Fecha de aprobación:** 04 de junio de 2017



### RESUMEN

Los rellenos sanitarios son diseñados para que dentro de su operación se desarrolle la menor cantidad posible de impactos ambientales; sin embargo, un aumento desproporcionado de residuos se traduce en un incremento en la producción de lixiviados, compuestos dispuestos en plantas de tratamiento apropiadas. Producto de este proceso, se genera un residuo conocido como 'lodos de lixiviados'. Para el caso del Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ), en Bogotá, Colombia, se recibe, en promedio 6.300 t/día de residuos; se trata 20,6 L/s de lixiviados y se produce 600 t/día de lodo de lixiviado, almacenadas sin ningún tipo de tratamiento.

Esta investigación buscó establecer la eficiencia del tratamiento de los lodos mediante un reactor biológico piloto del 'Sistema de Lodos Activados', complementado con aireación prolongada, para reducir así los valores de carga contaminante. Finalmente, se obtuvo una eficiencia de remoción superior al 80 % en los parámetros evaluados por el sistema piloto, debiéndose tener en cuenta, para el caso del RSDJ, cumplir la normatividad ambiental vigente (Resolución 0631 de 2015), la cual está reglamentada con base en la concentración de los contaminantes y no en relación a la eficiencia de remoción.

**Palabras clave:** aireación prolongada, impactos ambientales, lodo de lixiviado, lodos activados, relleno sanitario.

### Analysis of physicochemical parameters in a biological reactor in the treatment of leached sludge from Doña Juana Sanitary Landfill

### ABSTRACT

Landfills are designed so that the least possible amount of environmental impacts can develop within their operation; however, a disproportionate increase in waste results in an increase in the production of leachates, compounds disposed in appropriate treatment plants. As a result of this process, a waste known as 'leachate sludge' is generated. In the case of the Doña Juana Landfill (RSDJ), in Bogotá, Colombia, an average of 6,300 t / day of waste are received; 20.6 L / s of leachate are treated and 600 t / day of leachate sludge are produced, stored without any type of treatment.

\* Artículo Resultado de Investigación. Producto derivado del Proyecto de Investigación INV ING 1917 financiado por la vicerrectoría de investigaciones, Universidad Militar Nueva Granada.

\*\*<sup>✉</sup>Ingeniero Industrial, Ph.D., Profesor Asistente, Líder Grupo PIT, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Cundinamarca, Colombia. alvaro.chavez@unimilitar.edu.co

\*\*\* Ingeniero Geógrafo, Ph.D., Profesor Asociado, Investigador Grupo PIT, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia. Luis.pinzon@unimilitar.edu.co

\*\*\*\* Ingeniero Ambiental, Esp., Asistente de Investigación Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá D.C., Colombia. tmp.nicolas.casallas@unimilitar.edu.co



This research sought to establish the efficiency of sludge treatment by means of a pilot biological reactor of the 'Activated Sludge System', supplemented with prolonged aeration, in order to reduce the pollutant load values. Finally, a removal efficiency greater than 80% was obtained in the parameters evaluated by the pilot system, and it must be taken into account, in the case of the RSDJ, to comply with the current environmental regulations (Resolution 0631 of 2015), which is regulated on the basis of the concentration of pollutants and not in relation to removal efficiency.

**Key words:** Landfill, leached sludge, activated sludge, prolonged aeration and environmental impacts.

## Análise de parâmetros físico-químicos em um reator biológico no tratamento de lamas lixiviadas do aterro sanitário Doña Juana

RESUMO

Os aterros são projetados para que a menor quantidade possível de impactos ambientais possa se desenvolver dentro de sua operação; no entanto, um aumento desproporcional nos resíduos resulta em um aumento na produção de lixiviados, compostos dispostos em instalações de tratamento adequadas. Como resultado deste processo, é gerado um lixo conhecido como lodo de lixiviação. Aterro Doña Juana (RSDJ), em Bogotá, Colômbia, recebe uma média de 6.300 t / dia de resíduos; são tratados 20,6 L / s de lixiviados e são produzidos 600 t / dia de lodo de lixiviação, armazenados sem qualquer tipo de tratamento.

Esta pesquisa buscou estabelecer a eficiência do tratamento de lamas por meio de um reator biológico piloto do "Sistema de lodo ativado", complementado com aeração prolongada, a fim de reduzir os valores de carga de poluentes. Finalmente, obteve-se uma eficiência de remoção superior a 80% nos parâmetros avaliados pelo sistema piloto, e deve ser levado em consideração, no caso do RSDJ, cumprir os atuais regulamentos ambientais (Resolução 0631 de 2015), que é regulado com base na concentração de poluentes e não em relação à eficiência de remoção.

**Palavras-chave:** Aterro sanitário, lodo de lixiviados, lamas ativadas, aeração prolongada, impactos ambientais.

### I. Introducción

Una de las grandes preocupaciones que se presentan en la actualidad, son los cambios ambientales y las actividades que afectan el funcionamiento de los sistemas, generadas en su mayoría por el hombre.

Diariamente se genera en el planeta, millones de toneladas de residuos sólidos que son arrojados a superficies acuáticas y terrestres, sin que se les realice ningún tipo de control ni tratamiento, generando graves problemas de contaminación, que a su vez conllevan efectos definitivos sobre el mismo.

Para el año 2015 se produjo mundialmente, una cantidad aproximada de 5.120 millones de toneladas al día. En el mismo año Colombia generó 25.532 t/día; siendo la ciudad de Bogotá, la productora de 6.307

t/día, seguida por los departamentos de Antioquia, con 3.146 t/día y Valle del Cauca con 2.667 t/día (Departamento Nacional de Planeación, DNP, 2016).

En la actualidad existe una tendencia mundial que propende por el fortalecimiento de la conciencia ambiental de la sociedad; por tal motivo, se plantea una búsqueda permanente de mecanismos, estrategias y tecnologías capaces de mitigar la pérdida acelerada de los recursos naturales del planeta, como alternativa de solución al agotamiento de estos recursos, la pérdida de ecosistemas y la diversidad ecológica. Entre los problemas presentes se destaca los grandes inconvenientes relacionados con la generación y disposición final de los residuos sólidos (Avendaño, 2015).

Los rellenos sanitarios, como solución a esta generación y disposición, son lugares donde se acomoda los elementos que han cumplido con su vida útil. Estos sitios son diseñados según la producción real y la proyección de generación de residuos; cuentan con características que minimizan, mitigan y reducen los impactos ambientales que pueden generar su disposición inadecuada; usualmente están ubicados en lugares apartados de las zonas urbanas, debido a los olores que generan; son construidos para periodos de vida útil entre 25 y 30 años; están conformados por celdas, que una vez culminado su uso, son recubiertas con una membrana plástica y una capa de tierra de 0,60 – 0,80 m de espesor para su aislamiento e impermeabilización, permitiendo acondicionar el suelo para iniciar el proceso de sucesión natural o un proceso de revegetalización inducida (Jaramillo, 2002).

De los procesos internos de putrefacción y estabilización de la materia orgánica (MO) presente (por ser parte de ella tanto residuos inorgánicos como orgánicos) se presenta los lixiviados o líquidos resultantes, los cuales son almacenados y/o tratados para su posterior lanzamiento.

En los rellenos sanitarios, éstos son divididos en tres clases: joven, maduro y viejo, los cuales presentan su contenido de MO en mayor concentración en los líquidos jóvenes. En general, el lixiviado joven es un líquido altamente contaminante por su mayor grado de concentración de algunos elementos que lo componen, provenientes de la zona en disposición. El lixiviado maduro es aquél que procede de las zonas cerradas recientemente entre uno a cinco años. El lixiviado viejo proviene de las zonas cerradas mayores a cinco años, siendo las diferencias entre éstos, principalmente, en los altos contenidos de materia orgánica (Duarte, 2006).

"Las características fisicoquímicas de los lixiviados son inherentes tanto a la calidad de los residuos sólidos como a su grado de estabilización" (Ministerio del Medio Ambiente, 2002, p. 22). Desde que los desechos son generados y aun temporalmente dispuestos, tiene lugar la degradación aeróbica, que es comparable con la 'compostación' (proceso de compostaje\*). Ya en los rellenos:

\* El compostaje es un proceso de transformación de la materia orgánica para obtener 'compost', un abono natural (Nota de los autores).

Debido a la alta compresión de los residuos, el aire tomado de la atmósfera no es suficiente para compensar la demanda de oxígeno de los microorganismos, [originando] condiciones anaerobias. Esta situación es la causa del cambio de la biocenosis de aerobia a anaerobia facultativa y posteriormente a la tenencia de microorganismos anaerobios obligados. (Arrieta, 2008, p. 40).

Estos líquidos tienen una caracterización propia de parámetros fisicoquímicos, la cual se describe a continuación, con su respectiva técnica de detección:

- La materia orgánica, TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), una prueba donde se simula un proceso de lixiviación, para el caso la MO, donde se determina y valora la movilidad de los componentes orgánicos e inorgánicos presentes y su característica de toxicidad.
- El carbono orgánico se basa en la oxidación del carbono de la materia a dióxido de carbono; designa a un grupo de diversos compuestos orgánicos en varios estados de oxidación, algunos de los cuales son susceptibles de oxidación química o bioquímica (Henry y Heinke, 1999).
- Mercurio (Hg), presente en el ambiente conlleva efectos tóxicos representativos en los seres vivos, ya que es un metal que se acumula en los tejidos blandos y provoca enfermedades graves. En la forma orgánica, como metil-mercurio, un compuesto neurotóxico, es capaz de concentrarse en el organismo (bioacumulación) y ser parte de las cadenas alimenticias, causando envenenamiento. La prueba para la detección de este elemento se realiza mediante el método de espectrometría de adsorción atómica.
- Plomo (Pb): causante de problemas en el desarrollo del sistema nervioso central (SNC) del feto. En recién nacidos, este elemento puede ocasionar daños al cerebro y a los nervios periféricos, encargados de enviar información sensorial (tacto, dolor) del cuerpo hacia el SNC a través de la médula espinal. La prueba para la detección de este elemento se realiza mediante el método de espectrometría de adsorción atómica.
- Cromo (Cr): elemento que se encuentra en el ambiente en forma de Cr (III) y Cr (VI); el Cr (III) es un elemento esencial para los organismos que interfiere en el metabolismo del azúcar y causa problemas

de corazón cuando la dosis es muy baja. El Cr (VI) es mayoritariamente tóxico para el organismo, alterando el material genético y causando cáncer. La prueba para la detección de este elemento se realiza mediante el método de espectrometría de adsorción atómica.

- Cadmio (Cd), elemento que al ser ingerido, produce en los seres humanos una acumulación en los riñones, y conlleva su permanencia en el organismo por un tiempo aproximado de 30 años. La prueba para la detección de este elemento se realiza mediante el método de espectrometría de adsorción atómica.

- Cobre (Cu), elemento cuya ingestión en niveles altos puede producir náusea, vómitos y diarrea. Cantidades muy altas pueden dañar el hígado y los riñones, causando la muerte. La prueba para su detección se lleva a cabo mediante el método de espectrometría de adsorción atómica.

Dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, en los tratamientos secundarios y terciarios, tanto de líquidos como los lodos resultantes, se hace referencia a los procesos biológicos, ya sean aerobios o anaerobios (Ramalho, 2016).

Una de las alternativas para el tratamiento de los lodos de lixiviados son los reactores biológicos, como los utilizados en los procesos de lodos activados. Éstos, de carácter aeróbico, han sido empleados desde hace más de un siglo para el tratamiento de aguas residuales. Su implementación surgió de observar si el agua residual, al ser sometida a períodos determinados de aireación, reduce el contenido de MO, formando flocos sedimentables. En general, este proceso involucra la presencia de microorganismos como bacterias, hongos, algas, protozoos y rotíferos, entre otros (Guo, Yang, Xiang, Wang y Ren, 2013); (Ratkovich et al., 2013).

El objetivo principal del proceso de lodos activados es transformar el sustrato orgánico en sólidos biológicos que pueden ser separados a través de procesos de sedimentación. Este método se lleva a cabo en un reactor, el cual cuenta con un sistema de aireación, necesario para suministrar el oxígeno que demandan las bacterias, evitando que se genere asentamiento de la biomasa, además de mantener homogeneizado el licor de mezcla. Posteriormente, cuando la MO ha cumplido con su proceso de oxidación, el efluente es transportado a un sedimenta-

dor, en donde el flocos es separado del agua. Una parte de esa biomasa es recirculada hacia el reactor, y otra parte restante es llevada al tratamiento de lodos, con el propósito de no generar acumulaciones en exceso de microorganismos que afecten el desarrollo adecuado del proceso (Lee, Lim, Hung, Colosimo y Kim, 2014); (Urrea, Collado, Laca y Díaz, 2014).

Adicionalmente al proceso anterior, se encuentra la aireación prolongada, que permite generar transferencia de oxígeno disuelto en mayores cantidades, posibilitando la remoción de sustancias volátiles productoras de olores y sabores, de dióxido de carbono, de H<sub>2</sub>S, de hierro y manganeso, de metano, cloro y amoníaco, de compuestos orgánicos volátiles, entre otros. Una de las principales diferencias que tiene la aireación prolongada con los procesos convencionales de lodos activados, es que en ella se produce menor exceso de biomasa; sin embargo, requiere mayor cantidad de oxígeno para degradar la MO (Guo, Peng, Wang, Zheng, Huang y Ge, 2000); Tyagi, Subramaniyan, Kazmi y Chopra, 2008.

Para el caso de sustratos equivalentes se tomó el estudio de Morales (2007), llevado a cabo en el relleno sanitario La Esmeralda de la ciudad de Manizales, Colombia, donde se identificó el cambio de los parámetros fisicoquímicos en un reactor biológico de lodos activados, logrando valores de eficiencia de remoción: mercurio (Hg), 86 % plomo (Pb), 70 %, cromo (Cr) 92 %, y cadmio (Cd) 0 %.

El presente trabajo busca identificar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en el sistema piloto planteado, un reactor biológico de lodos activados con aireación prolongada, en el tratamiento de lodos de lixiviado provenientes del RSDJ, valorando entre otros, materia orgánica TCLP, carbono orgánico, mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), cobre (Cu), N, P y K, evaluando la eficiencia del tratamiento trazado, para su posterior diseño en el relleno, atendiendo cumplir la normatividad ambiental vigente, o sea, la Resolución 0631 de 2015, la cual está reglamentada con base en la concentración de los contaminantes y no en relación a la eficiencia de remoción, considerando que el RSDJ produjo para 2016 20,6 L/día de lixiviado, que pueden generar aproximadamente 300 t/día de lodo de lixiviado (sustrato en estudio).

## 2. Metodología

Para el desarrollo de la investigación se tomó diferentes muestras:

1. De lodos de lixiviado del RSDJ, Bogotá, efectuada al inicio de la práctica.
2. De biosólido proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG) (usado en el sustrato de trabajo del Sistema Piloto).
3. Muestras de lodo resultante del tratamiento, posterior a la sedimentación, con las que se verificó la eficiencia.

La custodia de estas muestras se basó en el seguimiento y monitoreo continuo, desde la toma, preservación, refrigeración, codificación, embalaje y transporte, hasta la recepción por el laboratorio (cadena de custodia) para su posterior análisis, siguiendo las recomendaciones del *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (s.f.).

Para realizar la caracterización de lodos del RSDJ se requirió coleccionar una muestra representativa. Para tal fin se obtuvo 20 contenedores, con un total de 400 kg., los cuales fueron coleccionados en las zonas llamadas 'Celdas de seguridad'.

De cada uno de éstos se tomó la cantidad de 1 kg., tomando finalmente 1 kg muestra, posterior al método de cuarteo.

Se tomó igualmente 20 contenedores, con un total de 400 kg del biosólido proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus de la UMNG, para ser usados en el sustrato de trabajo del Sistema Piloto, los cuales fueron coleccionados en las zonas llamadas 'Lecho de secado', y de cada uno de éstos se tomó la cantidad de 1 kg, tomando finalmente 1 kg muestra, posterior al método de cuarteo.

Para las muestras de lodo resultante del tratamiento, posterior a la sedimentación, se tomó un kg. Éstas fueron refrigeradas para su conservación, acumuladas semanalmente por tres meses, para luego ser homogeneizadas y tomar un kg base de muestra que fue enviada al laboratorio para valoración.

## Procesos del Sistema Piloto

El sistema piloto de lodos activados con aireación prolongada para el tratamiento de lodos de lixiviado está definido en las siguientes etapas:

1. Recolección de lodo de lixiviado en el RSDJ.
2. Implementación, adaptación y estabilización del reactor piloto, especificando que se trata de un proceso de aireación prolongada en un reactor biológico secuencial.
3. Operación diaria del sistema, indicando que la operación se hace diariamente por un periodo semanal para cada cantidad de sustrato (una semana será el tiempo de retención celular del lodo, donde se incluye tiempos de sedimentación, retiro del líquido clarificado, retiro del lodo sobrante y el proceso de cambio del sustrato o llenado del reactor.
4. Monitoreo y control. Consiste en la toma diaria de parámetros, como temperatura, pH y sólidos sedimentables TDS y conductividad.
5. Toma de muestras. 1 kg semanal del lodo resultante del tratamiento, una vez terminada la doceava semana (tres meses) para la determinación de la composición física, química y biológica de los sustratos resultantes del proceso.

La etapa de 'Implementación, adaptación y estabilización del reactor piloto' consistió en las siguientes fases:

1. Durante los primeros dos meses (Mes 1 y Mes 2) de esta fase se llevó a cabo el diseño y montaje del 'Reactor Piloto de Lodos Activados con Aireación Prolongada' con capacidad de 80 L para proceso, diseño, fabricación y montaje.
2. Fase de 'Adaptación y Estabilización del Sistema' para el continuo funcionamiento del reactor. Durante los siguientes cuatro meses (Mes 3, Mes 4, Mes 5 y Mes 6), el sistema comenzó su inoculación; por esta razón se agregó componentes alternos que ayudan a complementar tanto el hábitat como la nutrición de los microorganismos, permitiendo incrementar su desarrollo y conservación de la vida. El componente nutritivo usado fue la melaza de tipo comercial.

Para esta fase de cuatro meses (Mes 3, Mes 4, Mes 5 y Mes 6), el primer recambio de sustrato se realizó

después de cuatro semanas (un mes); los siguientes recambios, cada tres semanas, para un total de cuatro meses de adaptación.

Los agregados para el sustrato de recambio, usados a través de la mezcla de recambio, fueron: 7 kg lodo de lixiviado RSDJ + 7 kg de biosólido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la UMNG Campus Cajicá, + 250 gr de melaza; la mezcla se completó hasta llegar a un volumen de 80 L como tope, con agua tratada (de salida) de la PTAR del Campus, con el fin de ganar población bacteriana si se requiriera.

Durante estos meses de estabilización del reactor, se ejecutó los siguientes análisis, con el fin de verificar la existencia de población bacteriana y su aumento proporcional:

1. Con una frecuencia diaria: - oxígeno disuelto, pH, Conductividad eléctrica, temperatura y sólidos sedimentables – SS.

2. Con una frecuencia mensual: - componentes químicos y biológicos de la fase sólida y líquida del reactor en proceso de sedimentación; identificación y conteo de bacterias; Sólidos Totales Disueltos – STD; turbidez; porcentaje de saturación de oxígeno y nitratos.

Para la fase de ‘Operación diaria del sistema’ se deja indicado que la operación se hace por un periodo semanal para cada cantidad de sustrato (una semana será el tiempo de retención celular del lodo, donde se incluye tiempos de sedimentación, retiro del líquido clarificado, retiro del lodo sobrante y el proceso de cambio del sustrato o llenado del reactor.

El proceso de lodos activados con aireación prolongada se muestra en la Figura 1, donde se puede apreciar las fases de ‘Llenado’ semanal, ‘Aireación y reacción’ diaria, ‘Sedimentación’ semanal y ‘Extracción - decantación, purga y reposo’ semanal.

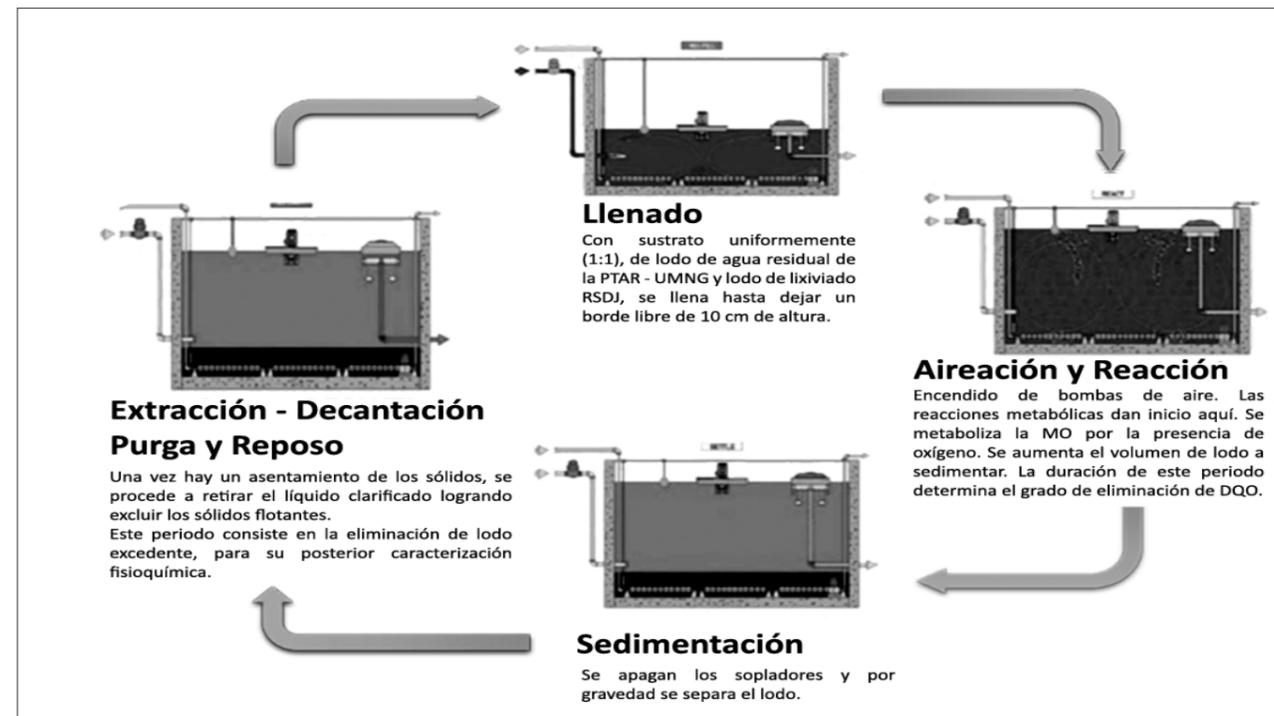


Figura 1. Proceso de lodos activados con aireación extendida.

### 3. Resultados

La Tabla 1 muestra los resultados de laboratorio para los lodos de lixiviado, la mezcla de lodo de lixiviado con el biosólido de la PTAR del campus Cajicá de la UMNG y, finalmente el resultado, luego del tratamiento de lodos activados, en donde se evaluó

diferentes parámetros. Para este caso se relaciona los resultados de materia orgánica TCLP, carbono orgánico, mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), cobre (Cu), N, P, K y se determina el porcentaje de remoción de la carga contaminante presente en los lodos de lixiviado.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos analizados durante el tratamiento de lodos activados

Parámetro	Unidad	Lodo de Lixiviado	Mezcla lodo lix - biosólido PTAR	Lodo Resultante del Tratamiento	(%) Eficiencia
Plomo	mg/kg Pb	0,51	0,11	0,09	18
Cadmio	mg/kg Cd	0,063	0,013	0,006	54
Cromo	mg/kg Cr	<0.05	<0.05	<0.05	-
Mercurio	mg/kg Hg	0,008	0,008	0,008	0
Cobre	mg/kg Cu	0,7	0,15	<0.05	66
Materia Orgánica TCLP	mg/kg	78690,89	34929,07	754,69	98
Nitrógeno	mg/kg N	847	1064	83,09	92
Fósforo	mg/kg P	19,14	14,61	2	86
Potasio	mg/kg K	758	491	278	43
Carbono Orgánico	mg/kg	45644,37	20260,48	437,76	98

### 4. Discusión

La cantidad de recursos necesarios para abastecer la población y los consecuentes residuos sólidos que se genera, han hecho necesaria la creación de procesos para su manejo y disposición en espacio conocidos como rellenos sanitarios. Éstos, en sus procesos de tratamiento, generan lixiviados y lodos altamente contaminantes, cuya composición varía de acuerdo con el tipo de residuo, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química y otras condiciones del lugar.

Éstos son altamente tóxicos, con alto contenido de materia orgánica y microorganismos patógenos (hongos, bacterias, actinomicetos, coliformes totales y fecales, salmonella sp, entre otros); también compuestos inorgánicos con concentraciones significativas de metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel y plomo).

El sistema piloto de lodos activados con aeración prolongada propuesto en este estudio para minimi-

zar el efecto contaminante, utiliza procesos biológicos que transforman materia biodegradable disuelta y particulada en productos finales (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, lodos de desecho); transforma sólidos suspendidos y no sedimentables en biopelícula; transforma nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, y degrada metales pesados.

Los procesos biológicos aerobios los realizan las bacterias heterótrofas facultativas, formando poblaciones heterogéneas de microorganismos, los cuales pueden ser bacterias unicelulares, hongos, algas, protozoos y rotíferos, resaltando que la fuente de carbono orgánico es el sustrato, y el oxígeno es el aceptor de electrones. La reacción biológica se denomina autocatalizada, dado que las bacterias tienen la capacidad de producir las enzimas que catalizan el proceso y, al mismo tiempo, las bacterias son producto del proceso. También, el proceso de tratamiento tiene como síntesis, elementos inorgánicos como nitrógeno y fósforo, vitales para el desarrollo celular.

La mezcla del sustrato, en este caso lodos de lixiviado con melaza y agua residual, se mantiene mediante la aireación mecánica de sopladores y difusores, aclarando que la digestión anaerobia es un proceso muy utilizado para estabilizar lodos de PTAR. El proceso de lodos activados generalmente se utiliza para transformar materia orgánica disuelta en biomasa, siendo un método utilizado debido a su alta eficiencia de remoción, facilidad de operación a través de un control de la biomasa del proceso, minimización de olores y considerando que los lodos generados cuentan con una alta mineralización, permitiendo así dos mundos para el tratamiento, con sus respectivas ventajas y desventajas, donde deben ser evaluados aspectos financieros y sociales para la toma de decisiones de implantación de plantas de operación.

Con el sistema aeróbico se logró la caracterización de los parámetros fisicoquímicos planteados al lodo de lixiviado resultante a la mezcla de lodo de lixiviado en el RSDJ con el biosólido de la PTAR UMNG, Campus Cajicá. Las concentraciones presentadas se dan por dilución (no se reporta en base seca).

La remoción de los parámetros analizados fue, para el caso de carbono orgánico y la MO, del 98 %, reflejando una alta oxidación propiciada por la aireación extendida dentro del reactor biológico, asegurando la oxidación, que puede ser medida por la demanda química de oxígeno (DQO).

Se logró una disminución considerable de la concentración de la mayoría de metales analizados, logrando eficiencias de plomo del 18 %, cadmio del 54 %, cromo no detectado, mercurio 0 %, cobre no detectado, siendo estas remociones vistas positivamente, ya que altos niveles como los presentados en la mezcla sustrato, son el principal foco de contaminación y preocupación por sus efectos en el ambiente y en la salud de las personas.

Respecto al nitrógeno, fósforo y potasio con eficiencias de remoción mostradas del 98 %, 92 % y 43 %, respectivamente, éstas permiten obtener niveles más manejables por las especies vegetales y sus desarrollos de fijación, envergadura y soporte al ecosistema como fuente alimentaria.

## 5. Conclusiones

Se puede establecer que el tratamiento de lodos activados con aireación prolongada aplicado a los lodos de lixiviado del RSDJ, mediante un sistema piloto, es una alternativa viable en la reducción de la carga contaminante presente en estos residuos.

De igual manera, los procesos biológicos y la aireación prolongada, con la reducción de los parámetros vistos, pueden originar la nitrificación, otorgando condiciones para que el lodo resultante del sistema tenga posibles empleos, como: material de cobertura en las celdas del relleno sanitario y/o comercial (abono orgánico). La ventaja de esta alternativa permite reforzar diferentes experiencias reportadas por la literatura, y genera la opción de reusar estos sustratos considerados contaminantes.

El sistema aeróbico piloto, una vez caracterizado su lodo final, en sus parámetros fisicoquímicos muestra remoción positiva para el caso de carbono orgánico y la MO, lo que evidencia una alta oxidación propiciada por la aireación prolongada dentro del reactor biológico, por la demanda química de oxígeno (DQO), logrando disminución de la concentración de la mayoría de metales pesados analizados, ya que altos niveles como los presentados en el sustrato, son el foco de contaminación y preocupación por sus efectos ambientales y la salud pública. También, eficiencias del nitrógeno, fósforo y potasio que permiten tener concentraciones manejables por las especies vegetales y su desarrollo.

Cabe resaltar que muchos autores han trabajado sobre lixiviados líquidos y el vertimiento de clarificados después del proceso de estabilización y descontaminación, pero este trabajo resalta su exposición en los lodos finales y su composición química.

## 6. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses del trabajo presentado.

## Referencias

Avendaño, E. (2015). *Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos. Análisis del caso Bogotá, D.C. Programa 'Basura Cero'*.

(Trabajo de grado). Recuperado de <http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/3417/1/79911240.pdf>

Arrieta, M. (2008). *Adecuación final y clausura de rellenos sanitarios*. (Trabajo de Grado). Recuperado de [repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/302/2/628.44564A775.pdf](http://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/302/2/628.44564A775.pdf)

Departamento Nacional de Planeación. (DNP). (2016). *Rellenos sanitarios de 321 municipios colapsarán en cinco años, advierte el DNP*. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsar%C3%A1n-en-cinco-a%C3%B1os,-advierte-el-DNP-.aspx>

Duarte, C. (Coord.). (2006). *Cambio global: Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Guo, J., Peng, Y., Wang, S., Zheng, Y., Huang, H. & Ge, S. (2009). Effective and robust partial nitrification to nitrite by real-time aeration duration control in an SBR treating domestic wastewater. *Process Biochemistry* 44(9), 979-985.

Guo, W., Yang, S., Xiang, W., Wang, X. & Ren, N. (2013). Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes. A comprehensive review. Recuperado de <http://europepmc.org/abstract/MED/23792182>

Henry, G. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental* (2ª ed.). México: Pearson Educación.

Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones*. Medellín, Colombia: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.

Lee, I., Lim, H., Hung, B., Colosimo, M. & Kim, H. (2014). Evaluation of aeration energy saving in two modified activated sludge processes. Recuperado de <http://europepmc.org/abstract/med/24784771>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 "por la cual se establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público

y se dicta otras disposiciones". Bogotá, Colombia. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf)

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía ambiental para rellenos sanitarios*. Bogotá, Colombia: El Ministerio.

Morales, C. (2007). *Estudio para la remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios*. (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1073/1/claudiajohanamorales.2007.pdf>

Ramallo, R. (2016). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec, Canada: By Priale.

Ratkovich, N., Horn, W., Helmus, F., Rosenberger, S., Naessens, W., Nopens, I. & Bentzen, T. (2012). Activated sludge rheology: a critical review on data collection and modelling. Recuperado de <http://europepmc.org/abstract/med/23219387>

Standart Methods for the examination of water and wastewater (22<sup>nd</sup> ed.). (s.f.). Recuperado de [https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en\\_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-water-testing-standard-methods-white-paper.pdf](https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-water-testing-standard-methods-white-paper.pdf)

Tyagi, V., Subramaniyan, S., Kazmi, A. & Chopra, A. (2008). Microbial community in conventional and extended aeration activated sludge in plants in India. *Ecological Indicators*, 8(5), 550-554.

Urrea, J., Collado, S., Laca, A. & Díaz, M. (2014). Wet oxidation of activated sludge: Transformations and mechanisms. *Journal of Environmental Management*, 146, 251-259.