

# **CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO A ESCALA PILOTO, PARA EL MANEJO DE LODOS PROVENIENTES DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE YOPAL**

Peña Perea, Sergio Andrés\*, Rodríguez Álvarez, Cesar Tadeo\*\* y Cristancho Quiroga, Víctor Alfonso\*\*

Fundación Universitaria de San Gil —UNISANGIL—  
Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Yopal, Colombia

cesarin8508@hotmail.com  
terranare@unisangil.edu.co  
spena@unisangil.edu.co

\* PEÑA PEREA, Sergio Andrés. Ingeniero Sanitario y Ambiental, Especialista en curso en Gerencia de Proyectos. Experiencia específica con el sector público en trabajos de ingeniería de aguas y aguas residuales, acueductos y alcantarillados, Experiencia en investigación con reactores biológicos, Aguas subterráneas y contaminación de ambientes acuáticos. Director de la Investigación realizada.

\*\*Egresados del programa de Ingeniería Ambiental de UNISANGIL Sede Yopal.

**Resumen**— Mediante este trabajo se analizó, en un conjunto de tres biodigestores, la mejor alternativa de tratamiento para los lodos provenientes de las lagunas de estabilización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de Yopal. Las aguas residuales son tratadas en dos trenes de tratamiento compuestos por lagunas de estabilización y filtros percoladores. El experimento se realizó mediante la utilización de tres contenedores cilíndricos, que fueron llenados de lodo residual de las lagunas. En uno de los biodigestores se agregó materia orgánica; en otro de los tres se agregó un inóculo de un proceso anaerobio de lodos de lecho fluidizado; y uno de los biodigestores fue tomado como base patrón. Luego, se probó cuál de los tres tratamientos realizados arrojaba mejores resultados y eficiencia en la estabilización del lodo; mostrando que el lodo tiene unas características fisicoquímicas y bacteriológicas óptimas y que ha alcanzado una maduración. Finalmente, se muestra que al utilizar un inóculo de otro proceso anaerobio, el tratamiento es más eficiente, pues los microorganismos vienen adaptados al ambiente y las condiciones típicas de un tratamiento anaerobio.

También se logró remover una gran concentración de metales pesados, obteniendo un lodo utilizable en actividades de recuperación de suelos y en sistemas agroforestales. La investigación se propone como alternativa de tratamiento, pues estos lodos se neutralizan con cal y se disponen en el relleno sanitario de la ciudad, sin un posible uso. La investigación es un referente con el cual la empresa de acueducto y alcantarillado tomará la medida correcta para el tratamiento de los lodos, que ya son un problema ambiental en el municipio.

**Palabras clave**— residuos líquidos, tratamiento de lodos, lagunas de oxidación, PLANTAR Yopal

**Abstract**— Through this study we have analyzed a set of three digesters the best treatment for sludge from the stabilization ponds Plant Wastewater Treatment municipality of Yopal. Wastewater is treated in two treatment trains consist of stabilization ponds and trickling filters. The experiment was conducted using three cylindrical containers, which were filled with sludge lagoons. In one of the digesters were added organic matter, in another of the three inoculum was added to an anaerobic process sludge fluidized bed and one of the digesters was taken as the base pattern. Finally, we tested which of the three treatments performed yield better results and efficiency in the stabilization of the sludge stabilization showing that the sludge has physicochemical and bacteriological characteristics optimal and that has reached maturity. Finally, we show that by using an inoculum of another anaerobic process, the treatment is more efficient because the organisms are adapted to the environment and conditions typical of anaerobic treatment.

Also managed to remove a large concentration of heavy metals and manages to obtain a usable mud in recovery of soils and agroforestry systems. The investigation was proposed as an alternative treatment, as these sludge is neutralized with lime and disposed in the landfill of the city, without a possible use. Research is a benchmark with which the water and sewerage company will take the correct measure for the treatment of sludge, which are an environmental problem in the municipality.

**Keywords** – liquid wastes, sludge treatment, oxidation ponds, Yopal PLANTAR

## I. INTRODUCCIÓN

En todo proceso de tratamiento de aguas residuales se generan elementos que representan gran contaminación para el medio. Se requiere de un procedimiento especial para este tipo de residuos, en un mayor caso, biosólidos generados de procesos primarios y secundarios de tratamiento [1]. En el municipio de Yopal se generaron alrededor de 5 toneladas por mes de lodo residual que luego es dispuesto en el relleno sanitario. Según los requerimientos enviados a la empresa de acueducto y alcantarillado de Yopal, de la Corporación Autónoma Regional de La Orinoquía, en Yopal es indispensable generar una solución que minimice el impacto generado por estos residuos y mejore los procesos y la calidad del agua. La implementación de biodigestores es una alternativa ampliamente conocida en la ingeniería ambiental [2] y es uno de los objetos de la investigación que aquí se presenta.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los lodos generados por las lagunas de oxidación en la planta de aguas residuales no reciben un tratamiento para eliminar sustancias tóxicas y disminuir la carga contaminante; solo se neutralizan con cal para modificar el pH y luego son dispuestos finalmente en el relleno sanitario municipal.

Para la realización del trabajo de campo se menciona, a continuación, el tipo de muestreo realizado y las condiciones que se tuvieron en cuenta.

El muestreo fue aleatorio por conglomerados, pues se tenía que preparar una muestra representativa de lodo de la laguna facultativa que mostrara características propias de todas las zonas de mezcla.

Se realizó la toma de muestras de lodo de la laguna facultativa que se encontraba en operación en el año 2009. Para garantizar la adecuada selección de la muestra, se tuvo en cuenta el nivel del lodo y la cercanía al centro de la laguna de estabilización. El lodo se extrajo utilizando un sistema de bombeo de lodos, con una potencia de 2 caballos de fuerza.

Se tuvo en cuenta para la prueba la Norma EPA part. 503 de la Agencia de Protección de Los Estados Unidos, para evaluar finalmente el uso potencial del lodo estabilizado. Aquí, se tienen en cuenta valores de parámetros microbiológicos como NMP de coliformes fecales y coliformes totales, parámetros de concentración de metales pesados, humedad, DBO y DQO, los cuales se miden al inicio y al final de la prueba realizada.

### A. Diseño y construcción del biodigestor

Se analizaron diferentes alternativas para la construcción de un biodigestor que cumpliera los requisitos para un funcionamiento anaerobio [3]. Se adecuó un contenedor cilíndrico de 20 litros para la prueba con dispositivos. El biodigestor se construyó con un terminal con sonda para la toma de datos, y un manómetro CT-466G para el control de presión.

Cada biodigestor se selló con tapa de seguridad y se ancló en una estructura de madera para su sostenimiento, como se muestra en la Figura 1. Finalmente, se construyeron tres biodigestores, cada uno con su manómetro y su terminal para la toma de datos.

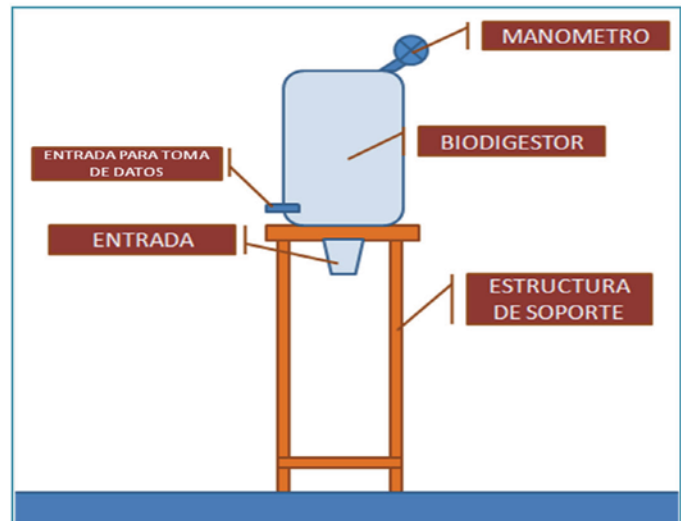


Figura 1. Biodigestor construido para el desarrollo de la investigación

### B. Variables y parámetros involucrados en el proceso

En el laboratorio de análisis de agua de la planta de aguas residuales de Yopal, se midieron diariamente con el equipo multiparámetro SCHOTT HANDYLAB LF1, el pH, la temperatura, los sólidos disueltos totales y la conductividad. Los datos de presión fueron tomados directamente del manómetro instalado en cada biodigestor.

La cantidad de DBO<sub>5</sub>, DQO, coliformes totales, E-Coli, arsénico, cadmio, mercurio, níquel y plomo corresponde a parámetros importantes para definir las características finales del lodo procedente de cada biodigestor. Cabe anotar que el lodo del total de la muestra fue dividido en volúmenes iguales para la prueba en cada uno de los biodigestores, por lo cual, los parámetros que definen su uso potencial se midieron al inicio y al final del proceso.

Durante los 45 días que duró la prueba, se tomaron los datos de los tres biodigestores. El tiempo para el desarrollo del trabajo en laboratorio se definió por la variación de la concentración de los parámetros evaluados hasta los últimos 10 días en que el lodo presentaba un estado estabilizado, pues el tiempo acá es definido por el proceso. Los datos fueron tomados en los tres biodigestores: al primero se le llamó "Testigo", pues solo contenía lodo proveniente de la laguna; al segundo se le añadió, además del lodo a tratar, un volumen de inóculo de 200 ml de otro proceso anaerobio; y al tercer biodigestor se le agregó una porción de un litro de materia orgánica.



Figura 2. Montaje de los biodigestores

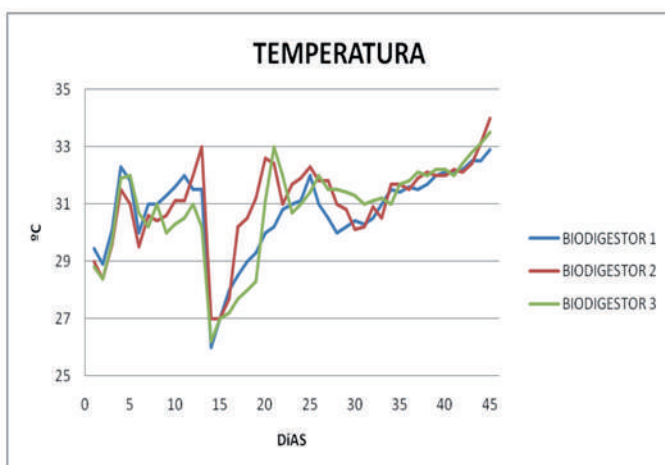
### III. RESULTADOS

Terminado el proceso anaerobio de estabilización del lodo en los tres biodigestores, se extrajo un (1) litro de biosólido de cada aparato para la medición de las variables en el laboratorio. Los datos analizados diariamente arrojaron la siguiente información.

#### A. Temperatura

Al inicio del proceso en los reactores, la temperatura de arranque se ubicó en 29.44°C (biodigestor nro. 1), 29°C (biodigestor nro. 2) y en 28.8°C (biodigestor nro. 3).

La temperatura en aumento dentro de los biodigestores es propia de la actividad microbiana en la estabilización del lodo, aunque el día 15 presentó un descenso debido a condiciones externas al proceso, que no ocasionaron daño grave en la investigación, y aportó al conocimiento de esta experiencia, que los biodigestores deben aislarse de toda influencia externa.



Gráfica 1. Comportamiento de la temperatura a lo largo del procedimiento

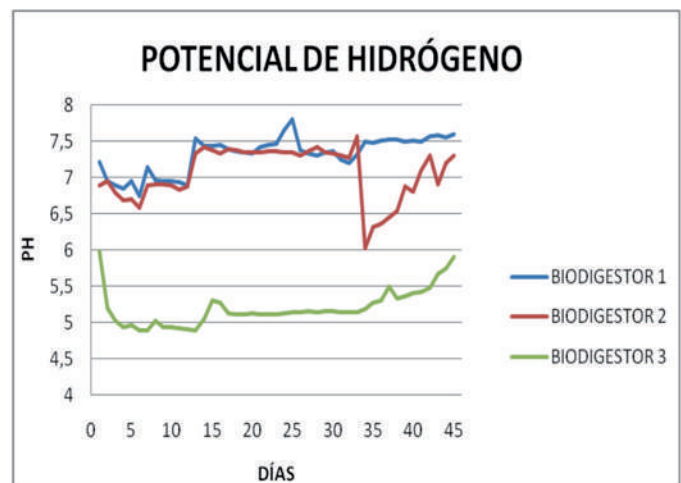
El biodigestor nro. 2 mostró temperaturas que superaron las alcanzadas por los otros dos reactores: esto debido a la actividad bacteriana favorecida por las bacterias presentes en

el inóculo proveniente de la PTAR de Maní, que le permitieron dar mejores resultados en combinación con el lodo de la PTAR Yopal. El biodigestor nro. 3 presentó temperaturas por debajo del nro. 2, mientras el biodigestor nro. 1 estuvo por debajo de los demás en cuanto a temperatura se refiere.

#### B. pH

Se evidenció un valor alcalino máximo de 7,6 para el biodigestor nro. 1, mientras el biodigestor nro. 2 registró un valor alcalino máximo de 7,3. De igual manera, se registraron valores mínimos alcalinos de 7,21 y 6,89 respectivamente en los reactores 1 y 2. El biodigestor nro. 3 presentó niveles de acidez altos, registrando valores inicial y final de 5,98 y 5,9 respectivamente.

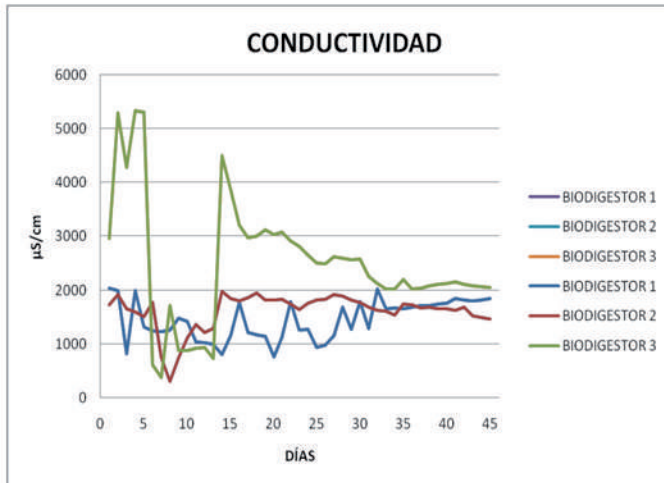
Este valor de pH se muestra por el volumen de materia orgánica aplicada en el biodigestor, pues la materia orgánica bajó el pH de la mezcla. En el intervalo de los días 3 a 6 presentó un incremento en la acidez, lo cual se refleja en un valor bajo de pH (gráfica 2). Posteriormente, el pH presentó una tendencia hacia valores cercanos al inicial, encontrándose estable en los últimos días.



Gráfica 2. Potencial de Hidrógeno medido durante el procedimiento

#### C. Conductividad

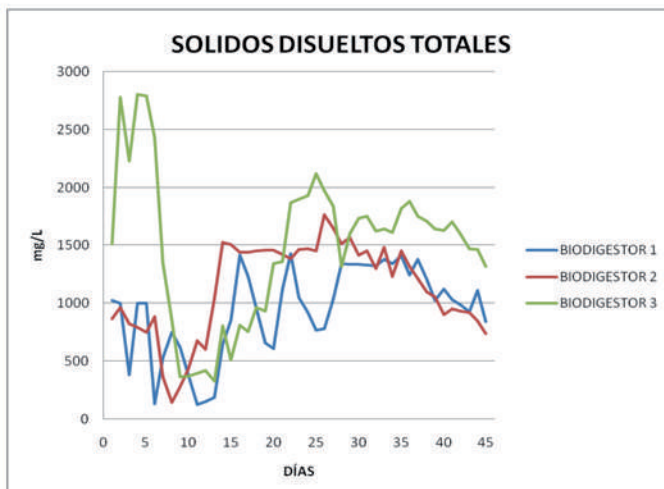
Los valores de conductividad para el biodigestor nro. 1 variaron entre 2030 y 1850  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (datos inicial y final respectivamente). El biodigestor nro. 2 mostró variaciones entre los días 1 y 9, intervalo a partir del cual el proceso se estabilizó (con respecto a este parámetro), conservando una tendencia hacia el decrecimiento; sin embargo, los valores de conductividad se mantuvieron por encima de los presentados por el reactor nro. 1. Por su parte, el reactor nro. 3 presentó un incremento hasta el día 5; seguidamente, la conductividad bajó entre los días 6 al 13, período a partir del cual el proceso se equilibró con tendencia a la disminución. Finalmente, este biodigestor presentó datos de conductividad altos con respecto a los otros dos biodigestores.



Gráfica 3. Comportamiento de la conductividad en el experimento

**D. Sólidos disueltos totales**

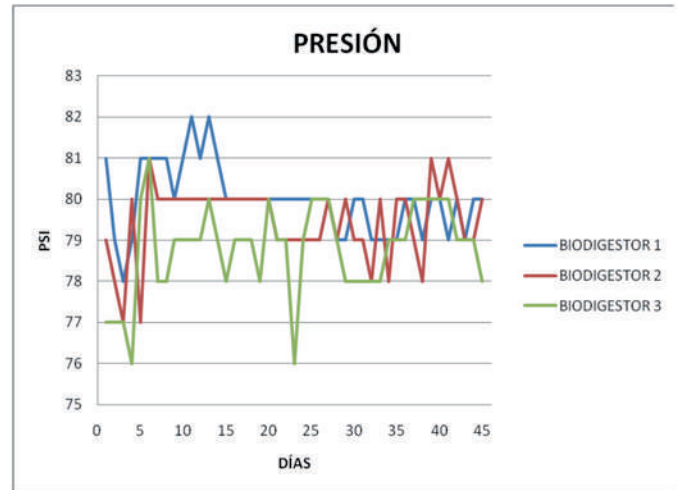
El comportamiento de los SDT en la gráfica 4 muestra variaciones de gran magnitud. El biodigestor nro. 1 presentó descenso entre los días 1 y 15; seguidamente, llegó a un valor alto después del cual volvió a bajar hasta el día 26. Posteriormente el proceso se estabilizó para generar una tendencia al decrecimiento. El biodigestor nro. 2 presentó un decaimiento en el parámetro hasta el día 12, a partir del cual los datos sufrieron un incremento que luego tomó equilibrio para finalmente llegar a un valor de 740 mg/L. El biodigestor nro. 3 conservó normalidad entre los días 1 y 7; del día 6 al 9 los TDS sufrieron decaimiento, que luego fue superado para estabilizarse y lograr una tendencia hacia la reducción. Este reactor registró los valores más altos de SDT en la prueba realizada.



Gráfica 4. Sólidos disueltos totales medidos en la prueba

**E. Presión**

La presión tiene un carácter significativo en la prueba, pues está asociada a la producción de gas metano. A manera general, la presión se mantiene constante, variando solo entre 77 y 81 Psi; esto se debe a que el gas fue liberado diariamente.



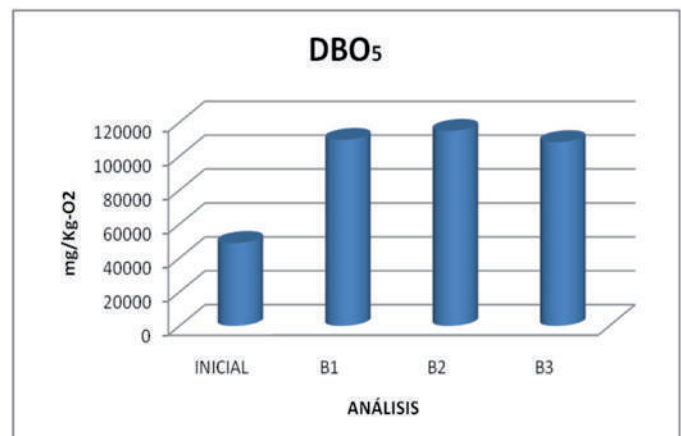
Gráfica 5. Presiones medidas en los biodigestores durante la prueba

**IV. PARÁMETROS MEDIDOS PARA DETERMINAR LA APLICACIÓN DEL BIOSÓLIDO**

Los parámetros que se midieron al inicio y al final del proceso y que son importantes a la hora de definir las características finales del lodo y su aplicación, arrojaron los siguientes resultados.

**A. DBO<sub>5</sub>**

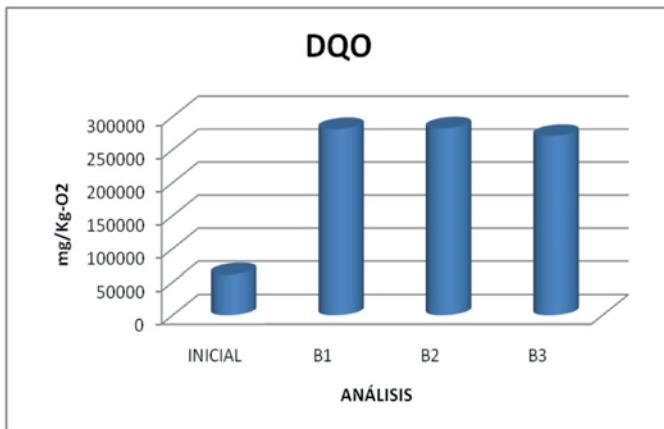
En el análisis de lodo inicial de la muestra tomada de la laguna facultativa de la PTAR de Yopal, se encontró un valor de DBO<sub>5</sub> de 48850 mg/Kg-O<sub>2</sub>. Después de realizado el tratamiento del lodo en los tres biodigestores, se reportó lo siguiente: en el biodigestor nro. 1 se obtuvieron datos de 109623 mg/Kg-O<sub>2</sub>, que en comparación con los datos iniciales, aumentaron. El biorreactor nro. 2 registró un valor de DBO<sub>5</sub> igual a 114911 mg/Kg-O<sub>2</sub>, que es un valor aún más alto que el del biorreactor nro. 1, lo que indica que fue aún más eficiente, si se tiene en cuenta que en este caso la eficiencia no está dada por la disminución en el valor de la DBO, si no en el aumento, pues se indica que en la prueba realizada se adquirió más material celular. El biodigestor nro. 3 presentó un valor de DBO<sub>5</sub> igual a 108296 mg/Kg-O<sub>2</sub>, muy similar al reactor nro. 1; sin embargo el reactor nro. 2 registró una mejor cantidad de masa celular que los demás (gráfica 6).



Gráfica 6. Datos de DBO<sub>5</sub> reportados al final del tratamiento

### B. DQO

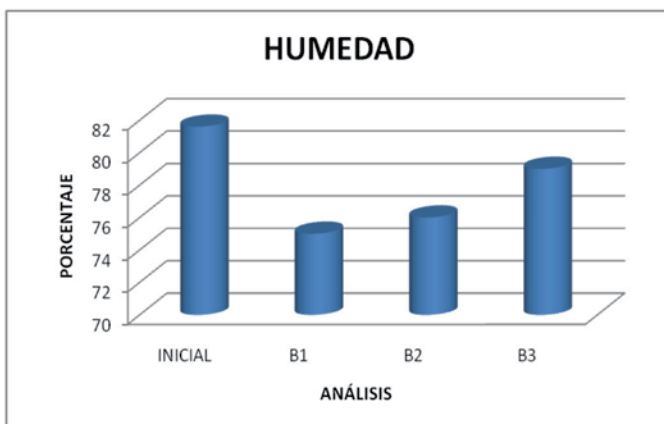
La DQO registró valores de 61286 mg/Kg-O<sub>2</sub> en el análisis inicial del lodo de la muestra. Al finalizar la prueba, el reactor nro. 1 presentó un valor de 281085 mg/Kg-O<sub>2</sub>; este valor superó el valor inicial, lo cual indica que aumentó la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por procesos químicos. El biodigestor nro. 2 registró datos de 282277 mg/Kg-O<sub>2</sub>, que es un valor aún más elevado que el reactor nro. 1 y al igual que la DBO, la DQO, se infiere aquí que la actividad de bacterias acondicionadas en un medio anaerobio (inóculo de la PTAR de Maní) induce en crecimiento de nuevo material celular que hace que el proceso sea óptimo. El reactor nro. 3 mostró valores de 270742 mg/Kg-O<sub>2</sub>, mostrando la menor eficiencia entre los 3 reactores (gráfica 7).



Gráfica 7. Valores de DQO reportadas para el proceso realizado

### C. Humedad

Por su parte, la humedad en el análisis inicial de la muestra unitaria registró un valor de 81,6%, que es un valor alto debido a que la muestra tomada fue bastante acuosa. El análisis del biosólido estabilizado después del proceso en el digestor nro. 1 presentó una humedad de 75%, mientras que el nro. 2 mostró humedad equivalente al 76%; el reactor nro. 3 registró 79%.



Gráfica 8. Valores de humedad inicial y en los biodigestores

### D. Metales pesados

El análisis comparativo de los metales pesados se evaluó teniendo en cuenta las unidades presentadas por el laboratorio y las registradas por la norma internacional de metales pesados para biosólidos [4]. Esto, debido a que el laboratorio arrojó resultados de metales pesados en base húmeda, mientras la norma los compara en base seca, por lo cual se utilizó un factor de conversión que permitió finalmente confrontar los resultados.

De esta manera, el análisis inicial en la PTAR Yopal, PLANTAR, registró un valor para el arsénico igual a 48,913 mg/Kg As en base seca. El biodigestor nro. 1 presentó 0,1 mg/Kg As; y la norma establece un límite permisible de 75 mg/Kg As, por lo cual la reducción de arsénico fue bastante significativa. El reactor nro. 2 mostró un valor de arsénico equivalente a 0,1083 mg/Kg As; igualmente se encuentra muy por debajo del límite establecido. El digestor nro. 3 registró un valor de 0,104 mg/Kg As. Se concluye entonces que los valores mostrados en los tres reactores se encuentran cumpliendo la norma en cuanto a concentración de arsénico.

La concentración de cadmio en el análisis inicial arrojó un valor de 24,456 mg/Kg Cd; la norma sugiere un valor de 85 mg/Kg Cd. El biodigestor nro. 1 presentó 2,5 mg/Kg Cd, dato que es muy inferior al establecido por la norma. El reactor nro. 2 registró un valor de 2,5 mg/Kg Cd, y el nro. 3 mostró 2,5 mg/Kg Cd, datos similares que, al compararlos, evidencian una remoción significativa de cadmio.

Por su parte, el cromo presentó valores de 489,13 mg/Kg Cr en el análisis inicial, mientras el digestor nro. 1 tuvo 91,67 mg/Kg Cr. La norma sugiere un valor de 3000 mg/Kg Cr; por lo tanto, el biodigestor presentó gran reducción de Cd, evidenciando buena eficiencia. El digestor nro. 2 registró 100 mg/Kg Cr, valor que también se encuentra muy por debajo del límite permisible. El reactor nro. 3 mostró 83,33 mg/Kg Cr, valor que, al igual que los demás reactores, cumple con la normatividad.

Ahora, la normatividad sugiere una concentración de plomo de 840 mg/Kg Pb. El digestor nro. 1 registró un valor de 416,66 mg/Kg Pb, un valor inferior al límite permisible. El reactor nro. 2 presentó 491,67 mg/Kg Pb, mientras el biodigestor nro. 3 mostró un valor de 500 mg/Kg Pb, siendo el mayor valor registrado entre los tres reactores; los cuales, en general, mostraron eficiencias altas convenientes para el uso del biosólido en suelos.

El valor permisible para el mercurio es de 57 mg/Kg Hg. El digestor nro. 1 ofreció un valor de 0,21 mg/Kg Hg, que se encuentra dentro del intervalo de permisibilidad del Hg. El digestor nro. 2 registró un valor de 0,033 mg/Kg Hg, excesivamente pequeño en comparación con la norma. El reactor nro. 3 presentó una concentración de Hg de 0,083 mg/Kg Hg. El reactor nro. 1 presentó el valor más alto de Hg, mientras el reactor nro. 2 presentó el mejor resultado posiblemente gracias al inóculo.

El níquel registró datos de 1304.35 mg/Kg Ni, en el análisis inicial; el valor sugerido por la norma es 420 mg/Kg Ni. El digestor nro. 1 evidenció al final del proceso un valor de 100 mg/Kg Ni, mostrando buena reducción de Ni y cumpliendo con los parámetros establecidos por la normatividad internacional. El reactor nro. 2 tuvo un valor de 75 mg/Kg Ni y el nro. 3 registró 108.33 mg/Kg Ni, valor que superó los obtenidos por los otros dos reactores. En la remoción de níquel, el digestor nro. 2 evidenció el mejor resultado.

TABLA I  
VALORES MEDIDOS DE METALES PESADOS AL INICIO Y FIN DEL PROCESO REALIZADO

	As mg/Kg As	Cd mg/Kg Cd	Cr mg/Kg Cr	Pb mg/Kg Pb	Hg mg/Kg Hg	Ni mg/Kg Ni
	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS
<b>INICIAL</b>	48,913	24,456	489,1	733,69	163,04	1304
<b>B1</b>	0,1	2,5	91,67	416,66	0,21	100
<b>B2</b>	0,1083	2,5	100	491,67	0,033	75
<b>B3</b>	0,104	2,5	83,33	500	0,083	108,33

#### E. Datos microbiológicos

Para los datos microbiológicos, los resultados de Coliformes totales implican el uso de la norma EPA part 503 [5], la cual indica que la concentración de Coliformes totales para clasificación A del biosólido debe estar por debajo de 1000 NMP/g. Sin embargo, en el digestor nro. 1 se obtuvo un valor de  $58 \times 10^6$  NMP/g, dato que se encuentra por fuera de los límites establecidos por la EPA para clasificación A del biosólido.

El digestor nro. 2 arrojó un estimativo de  $40 \times 10^8$  NMP/g, dato que no cumple la norma establecida por la EPA; mientras el digestor nro. 3 registró  $16 \times 10^7$  NMP/g.

El digestor nro. 1 registró el resultado más bajo en términos microbiológicos entre los tres reactores, debido a que éste presentó una eficiencia relativamente baja en comparación con los otros dos reactores. El reactor nro. 2 (inóculo de la PTAR Maní) presentó niveles de Coliformes totales por encima del reactor "testigo" (nro. 1), y se debe quizás a la presencia de material celular proveniente de otro proceso anaerobio, del cual viene ya adaptado.

El análisis inicial del lodo de la muestra representativa de la PTAR Yopal presentó un valor de  $4,8 \times 10^9$  NMP/g. Los reactores 1, 2 y 3 presentaron una reducción de Coliformes fecales; sin embargo, no se encuentran dentro del rango de la norma EPA para clasificación A (uso agrícola sin restricciones). Por ello es importante sugerir un postratamiento para eliminar microorganismos que pueden convertirse en un riesgo biológico, así como para obtener un biosólido clasificación A que no tiene limitaciones para su empleo en la agricultura.

Por su parte, el análisis de Escherichia Coli arrojó un valor de  $22 \times 10^7$  NMP/g para el análisis inicial del lodo. El biodigestor nro. 1 dio un estimativo de  $39 \times 10^4$  NMP/g, valor que se encuentra muy por debajo del dato inicial, lo cual indica una disminución. El digestor nro. 2 evidenció  $16 \times 10^6$  NMP/g, un valor que se encuentra por encima del reactor nro. 1 pero que se justifica por la adición de bacterias activas en el inóculo. El reactor nro. 3 presentó  $2,8 \times 10^6$  NMP/g, dato que muestra una reducción apreciable del contenido microbiológico.

TABLA II  
VALORES MEDIDOS AL INICIO Y AL FINAL DE LOS PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

	COLIFORMES TOTALES		E. COLI	
	ADM.	1000	ADM.	1000
	DATOS		DATOS	
<b>INICIAL</b>	4,80E+09		2,20E+08	
<b>B1</b>	5,80E+07		2,90E+05	
<b>B2</b>	4,00E+09		1,60E+07	
<b>B3</b>	1,60E+08		2,80E+06	

#### V. CONCLUSIONES

La construcción de un biodigestor anaerobio en la Planta de Tratamiento de Yopal, PLANTAR, es una alternativa aconsejable que contribuyó significativamente en la remoción de metales pesados y en la conversión de materia orgánica común en material fácilmente degradable o digerible por microorganismos.

El comportamiento de los parámetros medidos permitió conocer que en este tipo de procesos se puede llegar a una estabilización de lodo residual en condiciones anaerobias.

El biosólido generado en todos los biodigestores se encuentra en clasificación B, según la norma EPA Part 503[4]. Puede emplearse como biosólido para aprovechamiento forestal; sin embargo, se debe realizar un control de las concentraciones acumulativas, las cuales no deben excederse en los lugares de aplicación al terreno.

La concentración de metales pesados como As, Cd, Cr, Pb del lodo residual del municipio de Yopal después del tratamiento, está dentro de los límites permisibles establecidos por la norma 503 de la EPA [4]. No obstante, el Hg y Ni sobrepasan dichos límites; por lo tanto, la aplicación de estos lodos sin tratamiento asistiría a la acumulación de metales a niveles dañinos.

La presencia de Coliformes fecales y totales en el biosólido de los biodigestores no está dentro de los límites permisibles, de acuerdo con la norma EPA/625/1292/013/ (1999). Por tal razón el lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales de Yopal, con la presente estabilización, puede utilizarse solo para usos forestales y recuperación de suelos.

Con todo lo anterior, se debe restringir para cultivos y prácticas alimenticias, debido a la posible acumulación de microorganismos patógenos.

El biodigestor más eficiente fue el número 2, que corresponde al testigo con el inóculo de un sistema UASB (Sistema anaeróbico de flujo de ascendente). Debido a que el pH estuvo estable, la temperatura fue creciente y a la vez constante, degradó más materia orgánica que los demás según la DBO<sub>5</sub> y la DQO; también disminuyó la concentración de metales pesados significativamente con respecto a los resultados en los otros biodigestores.

#### REFERENCIAS

- [1] J. A. Romero Rojas. Lagunas de estabilización de aguas residuales; ED. Escuela Colombiana de Ingeniería; 2005; ISBN 958-8060-50-8; Cap. 13.
- [2] METCALF & EDDY, INC; Ingeniería de aguas residuales; ED. McGraw Hill; 1998; ISBN 84-481-1727-; Vol. 1.
- [3] J. A. Romero Rojas. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño; ED. Escuela Colombiana de Ingeniería; 2004; ISBN 958-8060-13-3; Cap. 26.
- [4] EPA. Folleto informativo de tecnología de biosólidos. Estados Unidos, 2000.
- [5] Norma EPA parte 503. Estados Unidos de América. 1994.