

# Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los lodos de la PTAR de la Ciudad de Panamá por la influencia del proceso de hidrólisis térmica (THP)

*Analysis of the physicochemical parameters of the sludge from the Panama City WWTP due to the influence of the thermal hydrolysis process (THP)*

Adis Karina Salinas Guerra<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Panamá. <sup>2</sup>Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

**Dirección para recibir correspondencia:** [adis.salinas1809@gmail.com](mailto:adis.salinas1809@gmail.com)

**Recibido:** 12/03/2023

**Revisión:** 25/06/2023

**Aceptado:** 27/06/2023

## Resumen

El crecimiento demográfico y la expansión industrial han llevado a la producción de volúmenes cada vez mayores de aguas residuales y han ampliado la demanda de métodos sostenibles para su tratamiento y disposición final. El proceso de hidrólisis térmica (THP) ha sido uno de los métodos que se ha desarrollado con el fin de mejorar el manejo de los lodos producidos durante el tratamiento de las aguas residuales. La ciudad de Panamá ha implementado este proceso en el segundo módulo de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR). La función del proceso de hidrólisis térmica es hacer que las paredes celulares se rompan bajo el efecto de la alta temperatura y presión, dando como resultado un producto altamente solubilizado que es fácilmente biodegradable. En esta investigación se analizaron en laboratorio los parámetros físicos y químicos correspondientes a un número de muestras tomadas directamente de esta planta, con el objetivo de medir la influencia que tiene la THP en la calidad de los lodos orgánicos. Estos resultados mostraron una significativa influencia del proceso THP en los lodos, encontrando una disminución del 40 al 60 por ciento de sólidos volátiles, este resultado evidencia un lodo de mejor calidad y menos volumen generado, pudiendo aprovecharse este en uso agrícola, entre otros usos posibles.

**Palabras claves:** agua residual, lodos hidrolizados, coliformes fecales, tratamiento de lodos, lodos pre espesados, lodos digeridos.

## Abstract

Population growth and industrial expansion have led to the production of ever-increasing volumes of wastewater and thus have also increased the demand for methods of wastewater treatment. The pretreatment of the thermal hydrolysis process (THP) has been one of the methods that have been developed in countries to improve the management of sludge produced during wastewater treatment. Panama City has implemented this process with the construction of the second WWTP Module. The function of the thermal hydrolysis process is to cause the cell walls to break under the effect of high temperature and pressure, resulting a highly solubilized product that is readily biodegradable. In this investigation, the physical and chemical parameters corresponding to several samples taken directly from this plant were analyzed in the laboratory, with the aim of measuring the influence that THP has on the quality of organic sludge. These results showed a significant influence of the THP process in the sludge, finding a 40 to 60 percent decrease in volatile solids, these results show a sludge of better quality and less volume generated, being able to take advantage of this in agricultural use, among other possible uses.

**Key words:** wastewater, hydrolyzed sludge, fecal coliforms, sludge treatment, pre-thickened sludge, digested sludge.



## Introducción

Debido a la gran cantidad de agua residual generada por la población, cada vez es más común utilizar métodos alternativos para el tratamiento de estas y de los lodos orgánicos que se producen durante su tratamiento. Uno de los aspectos más críticos en la operación de las plantas de tratamiento es el manejo de los lodos producidos en los procesos de sedimentación, puesto que sus características fisicoquímicas como sus volúmenes son distintos en cada caso y pueden variar de forma estacional o dependiendo de las condiciones climáticas (Rodríguez Torres, 2013). Estos lodos orgánicos provienen de los tanques de clarificación, sedimentación, sobrenadantes del espesamiento de lodos y de los residuos del proceso de deshidratación.

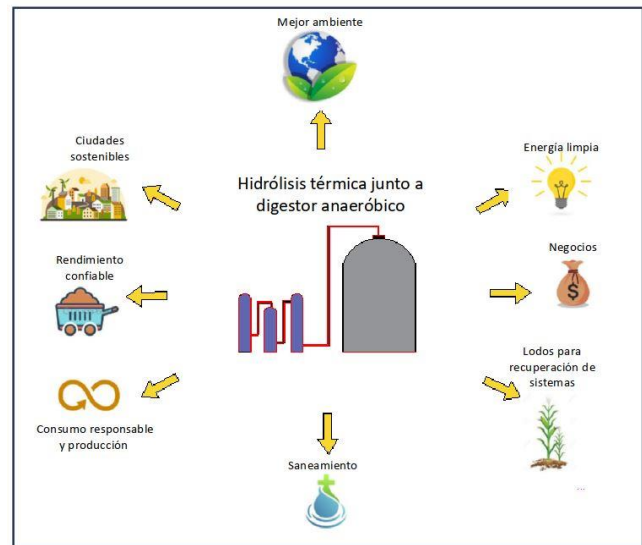
El tratamiento de los lodos orgánicos producidos implica la separación del agua y de los sólidos, y el grado de tratamiento requerido va a depender del método de disposición final.

El lodo obtenido directamente del tratamiento de las aguas residuales presenta un alto contenido en compuestos de diferente toxicidad, agentes patógenos y un contenido en sólidos muy bajo, dependiendo de las condiciones de operación (Amador-Díaz et al., 2015). Por esta razón es de gran importancia medioambiental, sanitaria e incluso por su potencial lucrativo el revalorizarlos y la realización de tratamientos específicos para los lodos residuales. Adicional, debido al gran volumen generado y su nivel tóxico innato, para la disposición final de estos se utiliza la aplicación de tratamientos de espesamiento, estabilización y deshidratación (que incluyen secado) con el objetivo que tengan un reúso sostenible.

La digestión anaerobia es un proceso muy estudiado sobre el cual se han realizado muchas mejoras buscando la recuperación de energía, reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, producir biosólidos de alta calidad y obtener bajos olores (Cárdenas Torrado & Molina Pérez, 2022). Dentro de estos avances se encuentra el pretratamiento de la hidrólisis térmica (THP), el cual ha sido uno de los métodos más populares en países desarrollados para acondicionar el lodo antes de la digestión anaerobia. El THP es conocido por su capacidad de desintegración altamente eficiente que mejora la producción de biogás y destruye patógenos.

La digestión anaeróbica con THP ha mostrado resultados efectivos en la remoción de sólidos volátiles y generación de biogás, en el manejo y eliminación de lodos orgánicos en países desarrollados (Medina Herrera, 2010). El pretratamiento de hidrólisis térmica solubiliza las partículas orgánicas y provoca la lisis de las paredes celulares.

**Figura 1: Principales beneficios de la hidrólisis térmica.**



Fuente: Adoptado de Gahlot y colaboradores (2022).

A finales del año 2008, el Gobierno Nacional de Panamá realizó la licitación de las obras que conforman el primer módulo de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Panamá. El inicio de la ejecución de las obras fue en el mes de noviembre de 2009, concluyéndolas en julio de 2013 con el inicio de operaciones de la línea de tratamiento de lodos.

Debido al colapso en las tinas de retención del relleno sanitario de Cerro Patacón, donde históricamente se recibían los vertidos provenientes de las descargas de camiones dedicados a las labores de limpiezas de tanques sépticos, letrinas, baños públicos y depósitos de industriales, se provocó una situación de grave contaminación ambiental y de riesgo sanitario en el río Cárdenas perteneciente a la cuenca del Canal de Panamá. Por lo anterior, a partir del 2017 se inicia la recepción de los vertidos de los camiones en la colectora Tocumen, aguas arriba de la Estación de Bombeo, dirigiendo el flujo posteriormente hasta la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, situación no contemplada en los requisitos de diseño de la PTAR. Esta condición obliga implementar una estación para

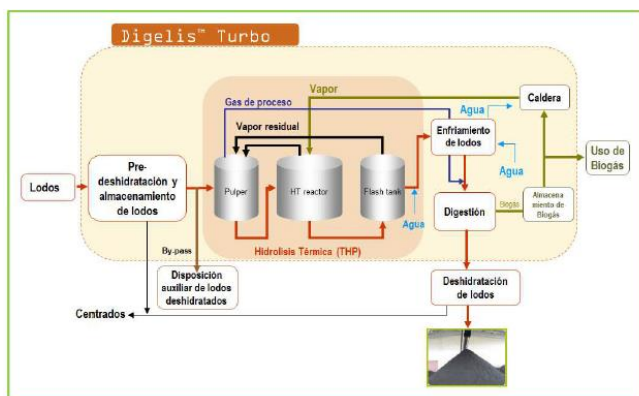
los lodos sépticos de la industria, construyendo dos tanques de ecuación con capacidad unitaria de 200 metros cúbicos cada uno.

En mayo 2017 se inicia la construcción del segundo módulo de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Panamá, finalizando su construcción en mayo 2022. Este segundo módulo incrementó la capacidad de la planta de tratamiento, además incorporó un proceso de hidrólisis térmica para tratar los lodos de ambos módulos.

La hidrólisis térmica resultó ser muy novedosa dado que anteriormente la línea de tratamiento de lodos operaba únicamente con un pre-espesamiento a gravedad, pre-deshidratación utilizando mesas espesadoras, digestión anaeróbica y deshidratación. La nueva PTAR incluye en la línea de lodos las siguientes etapas: pre-espesamiento a gravedad, pre-deshidratación, hidrólisis térmica, digestión anaerobia y deshidratación.

La PTAR de la Ciudad de Panamá consta de tres unidades básicas en su THP: el Pulper, tres reactores en funcionamiento continuo y el Flash Tank.

**Figura 2: Procesos de tratamiento de la línea de lodos en la PTAR de la ciudad de Panamá.**



Fuente: Suez Internacional S.A (2019).

La hidrólisis térmica es un proceso de acondicionamiento de lodos que se aplica como un pretratamiento antes de la digestión anaeróbica, consiste en someter el lodo a elevada presión y temperatura durante un tiempo establecido, con el objetivo de conseguir la ruptura de estructuras que componen el lodo, incrementando su

biodegradabilidad. (American Water Chemicals, Inc., 2022 y Salinas et al., 2022).

La digestión anaerobia sucede en una serie de etapas en las cuales se van transformando los lodos residuales en subproductos de degradación; la primera etapa se denominada hidrólisis, la segunda acidogénesis o fermentación, la tercera acetogénesis y la cuarta metanogénesis (Cárdenas et al., 2016).

Para aumentar la eficacia del proceso de digestión anaerobia se opta por realizar pretratamientos antes de la digestión anaerobia, como la hidrólisis térmica.

El objetivo de los pretratamientos es hacer el sustrato más accesible a las bacterias anaerobias, acelerando el proceso de digestión (aumento de la cantidad de metano producida) y disminuyendo la cantidad de lodos a depositar (Martín Arroyo, 2015).

La hidrólisis trata de la conversión de biopolímeros (proteínas, hidratos de carbono y grasas) en sus monómeros respectivos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga). Dicha conversión la llevan a cabo enzimas extracelulares, las cuales son producidas por bacterias hidrolíticas facultativas o estrictamente anaerobias. Es un proceso lento, cuya velocidad de degradación se ve afectada por un gran número de factores (Martín Arroyo, 2015).

A pesar de las ventajas antes mencionadas, la digestión anaerobia de residuos de naturaleza sólida, como los lodos, presenta una limitación en la etapa de hidrólisis; en la cual la velocidad de degradación es lenta, debido a la baja solubilización de la materia orgánica suspendida y los sólidos orgánicos (Martín Arroyo, 2015).

El proceso de hidrólisis térmica consta de tres unidades básicas: el pulper, el reactor y el flash tank. Cuando los residuos se introducen en el sistema de hidrólisis térmica, primero se transfieren al tanque pulper a través de sinfines ubicados en la parte inferior del depósito de almacenamiento y las bombas (Salinas et al., 2022). Los residuos precalentados son bombeados al recipiente del reactor donde se calentará a aproximadamente 329°F (165°C) y a una presión de aproximadamente 120-130 PSI.

Después del tiempo de hidrolización adecuado, los residuos se transfieren del reactor al flash tank. La

temperatura de los residuos que salen del flash tank es demasiado alta para alimentar un digestor mesófilo y requiere enfriamiento y dilución. Además, debe de existir una fuente de vapor fresco para calentar los reactores, lo que significa que se requiere una caldera como parte del proceso.

Por lo general, el biogás generado se procesa a través de una instalación de cogeneración de calor y electricidad para producir energía eléctrica y la mayor parte del vapor necesario para la hidrólisis térmica. La cantidad de calor residual del sistema de hidrólisis térmica generalmente proporciona del 75 al 95% de los requisitos totales de energía de vapor (Barber et al., 2022).

### Antecedentes

La utilización de la THP se ha realizado en los últimos años en diversos países siendo algunos de estos

casos la planta de tratamiento de agua residual de Ceyhan en Turquía, la PTAR de Guijuelo en Salamanca, la PTAR de Copero en Sevilla (como intertratamiento), en la planta de biometanización de Las Dehesas en Valdemingómez, en la PTAR de Pinedo en Valencia, la PTAR de EMASESA de Sevilla y la PTAR de SOMACYL en Castilla y León, obteniéndose en ellos resultados satisfactorios en cuanto a la producción de biogás y mejorando el proceso de tratamiento de lodos (Fernández Polanco, 2023).

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en el estudio de Fernández Polanco (2023) relacionados a la identificación de Salmonella en lodos no hidrolizados y lodos hidrolizados confirmando el buen resultado obtenido en remoción de Salmonella con la introducción de la THP.

**Tabla 1: Análisis Microbiológico de lodos hidrolizados comparados con lodos no hidrolizados.**

Fecha del muestreo	Lodo sin hidrolizar		Lodo hidrolizado	
	E. Coli (UFC/gr)	Salmonella (UFC/25 gr)	E. Coli (UFC/gr)	Salmonella (UFC/25 gr)
23/02/2021	13.00	Detectado	<1	No detectado
05/03/2021	17.00	Detectado	<1	No detectado
10/03/2021	17.00	Detectado	<1	No detectado
17/03/2021	26.00	Detectado	<1	No detectado
24/03/2021	20.00	Detectado	<1	No detectado
07/04/2021	13.00	Detectado	<1	No detectado
14/04/2021	11.00	Detectado	-	No detectado
28/04/2021	20.00	Detectado	<1	No detectado

Fuente: Fernández Polanco (2023).

Es importante indicar que los equipos de hidrólisis térmica han sido patentados por empresas que comercializan esta tecnología.

Con el objetivo de comparar dos de estas tecnologías patentadas se realizó un estudio para determinar las diferencias entre un sistema de tanques discontinuos y otro que opera con flujo a pistón, encontrando que el sistema que opera con flujo a pistón proporciona una solución de hidrólisis térmica a un costo menor que el que opera con tanques discontinuos (Abu-Orf & Goss, 2012).

La Autoridad del Agua y Alcantarillado del Distrito de Columbia (DC WASA) buscando mejorar el proceso de tratamiento de biosólidos evaluó el secado y la

hidrólisis térmica para eliminar la reactivación o rebrote de organismos, así como optimizar la recuperación de biogás. En esta evaluación se determinó que la hidrólisis térmica junto con la digestión anaerobia obtiene mejores resultados comparado con el secado térmico (Abu-Orf, 2009).

La utilización de THP a nivel de escala en laboratorio ha dado resultados positivos en la reducción de sólidos suspendidos volátiles por más de 49%, asimismo se ha identificado una aceleración en la producción de biogás en la digestión anaerobia de lodos debido a la mejora de la hidrólisis de proteínas y la acidogénesis de carbohidratos como resultado de la incorporación de la THP (Han et al., 2017).

Una de las ventajas que se ha identificado en la utilización de la THP en plantas de tratamiento a escala real es la disminución del volumen de los digestores y de lodos deshidratado que necesitan disposición final (García Cascallana et al., 2021).

## Materiales y método

La investigación es de tipo cuantitativa con alcance descriptivo, dado que los resultados obtenidos se aplicaron a una muestra por conveniencia para lograr evidenciar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de los lodos de una planta de tratamiento de agua residual cuando se aplica el proceso de pretratamiento con hidrólisis térmica (THP).

El desarrollo de la parte experimental del estudio consistió en la obtención de muestras a conveniencia de la PTAR de la ciudad de Panamá, con el objetivo de analizar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de los lodos en una PTAR al aplicar THP.

En Panamá existe el Reglamento técnico norma de uso y disposición de lodos, Acuerdo Gubernativo, DGNTI-COPANIT 47-2000, (Dirección General de Normas y Tecnología Industrial, 2000) en donde se encuentra una sección destinada al análisis y manejo de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales cuyos límites máximos permisibles son los empleados en el análisis comparativo realizado.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reconocido a los coliformes fecales como un indicador fecal, el indicador más utilizado es la *Escherichia coli* (Organización Mundial de la Salud [OMS], 1995). Este indicador proporciona un espectro de las enfermedades transmitidas a través de los lodos, determinando su grado de eliminación se podría determinar la eficiencia de remoción del tratamiento utilizado.

Para su adecuado crecimiento, todos los organismos vivos requieren elementos como hierro, cromo, cobre, zinc y cobalto en cantidades diferentes (cantidades macro y micro). Aunque las cantidades macro y micro de metales son esenciales para un normal desarrollo de la vida biológica, estos elementos pueden llegar a ser tóxicos cuando se presentan en cantidades elevadas (Galindo, 2010).

Si el lodo proveniente de la PTAR será utilizado para uso agrícola es necesario determinar elementos como arsénico, cadmio, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio y zinc (Khakbaz et al., 2020).

En Panamá, estos lodos de PTAR deben cumplir con las concentraciones establecidas en la normativa COPANIT 47-2000 antes de poder utilizarlos en cualquier uso que involucre su disposición en el suelo.

Un criterio utilizado en este estudio para poder analizar las muestras de lodos fue verificar un porcentaje de deshidratación de lodos entre el 10 y 16% que es el que requiere la hidrólisis térmica para funcionar de forma adecuada. En este estudio los lodos preespesados de las muestras analizadas presentaron un porcentaje del 10 al 14%.

Los resultados obtenidos del análisis de laboratorio para lodos preespesados e hidrolizados fueron sometidos a una comparación de medias utilizando una hoja electrónica.

## Muestreo de lodos

Se analizaron lodos preespesados obtenidos luego de ser predeshidratados y lodos hidrolizados obtenidos luego de pasar por la hidrólisis térmica.

Para la determinación de metales pesados se utilizó lodo digerido debido a que la hidrólisis térmica no afecta estos parámetros por ser un proceso que utiliza altas temperaturas.

Todo el proceso de captación de muestra de lodo, análisis y procesamiento se realizó bajo los lineamientos de la Norma Técnica DGNTI-COPANIT 47-2000, para lo cual se tomaron muestras de lodo durante 10 días continuos en un periodo de 4 horas a conveniencia, y se utilizaron envases esterilizados con el fin de evitar contaminación cruzada.

## Número de muestras de lodo a analizar

Para determinar la cantidad de repeticiones para asegurar la confiabilidad de las muestras de lodos que se analizarían se utilizó el método estadístico que propone la American Public Health Association [APHA] y colaboradores (2023). Este procedimiento consistente en la utilización de unas gráficas de curvas de confianza con base en la ecuación 1 mostrada a continuación.

$$N \geq \left(\frac{ts}{U}\right)^2 \quad (1)$$

En donde,

N = número de muestras

t = student-t para un determinado nivel de confianza

s = desviación estándar

U= nivel de incertidumbre aceptable

Adicional para realizar la comprobación se realizó la estimación estadística que utiliza la distribución t-student de dos colas, la que se define utilizando la ecuación 2 mostrada a continuación.

$$n = \left(\frac{ts}{X-\mu}\right)^2 \quad (2)$$

En donde,

n = tamaño muestral

t = student-t para un determinado nivel de confianza

s = desviación estándar

X = media muestral

$\mu$  = valor a evaluar

Para los sólidos totales utilizando el procedimiento del Standard Methods se establece que para S/U=1.30 y un nivel de confianza del 95%, se obtienen un total de 10 repeticiones para obtener dicho nivel de confianza.

Se realizó el mismo cálculo para el pH resultando que para un S/U=1.30 y un nivel de confianza del 95%, se obtienen de igual forma un total de 10 repeticiones.

Con el número de repeticiones obtenidas a través de la recomendación que da el Standard Methods se definió que 10 muestras de lodo podrían dar como resultado un dato con un nivel adecuado de confianza considerando que las características del lodo no varían de forma significativa y dado que el alcance del estudio solo pretende describir el comportamiento de las variables objeto del estudio.

### Métodos analíticos

- **Potencial de Hidrógeno (pH):** Para determinar pH se realizó una dilución 1:10. Se midió el pH utilizando un potenciómetro portátil según norma ISO 10390-2005.
- **Coliformes fecales:** Se obtuvo con una dilución de la muestra 10-1, se hizo un duplicado para cada muestra para el control de calidad, y se utilizó la técnica de número más probable según norma ISO

9308-2:2012 método Colilert 18/Quanti Tray (Salinas et al., 2022).

- **Sólidos totales:** Para determinar sólidos totales se realizó una dilución 1:10 y se aplicó la metodología SM-2540-B del Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 24th Edition (2023).
- **Sólidos volátiles:** Para determinar sólidos volátiles se realizó una dilución 1:10, utilizando la metodología SM-2540-B del Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 24th Edition (2023).
- **Metales pesados:** Se realizó según el método de la EPA 200.7 (Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry).

### Resultados

En la tabla 2 se observa la variabilidad del pH obtenido en diez muestras de lodos preespesados e hidrolizados.

**Tabla 2: Variabilidad del pH en los lodos preespesados e hidrolizados.**

Número de muestra	Potencial de Hidrogeno (pH)		Disminución de pH
	Lodo preespesado	Lodo hidrolizado	
Muestra 1	6.46	6.11	5%
Muestra 2	6.80	5.61	18%
Muestra 3	6.73	5.85	13%
Muestra 4	6.97	5.77	17%
Muestra 5	6.40	5.78	10%
Muestra 6	6.23	5.79	7%
Muestra 7	6.57	5.75	12%
Muestra 8	7.15	5.97	17%
Muestra 9	7.36	6.45	12%
Muestra 10	6.95	5.56	20%

En la tabla 3 se observan los resultados obtenidos en la medición de coliformes fecales en diez muestras de lodos preespesados e hidrolizados obtenidos del estudio de Salinas y colaboradores (2022).

La figura 3 muestra la gráfica de los resultados de coliformes fecales para lodos preespesados del estudio de Salinas y colaboradores (2022) y el límite máximo permitido según la norma COPANIT 47-2000.

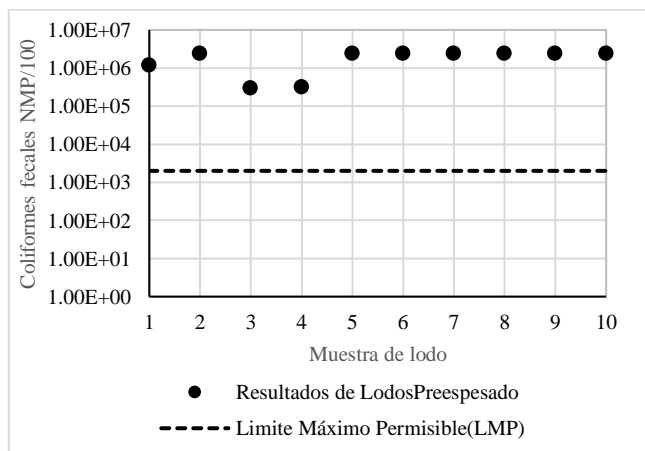
La figura 4 muestra la gráfica de los resultados de la determinación de coliformes fecales para lodos hidrolizados del estudio de Salinas y colaboradores (2022) y el límite máximo permitido según norma COPANIT 47-2000.

**Tabla 3: Resultados para coliforme fecales en lodos preespesados y lodo hidrolizado.**

Número de Muestra	Coliformes fecales (NMP/100 ml)		Disminución en Coliformes log10
	Lodo preespesado	lodo hidrolizado	
Muestra 1	1.20E+06	1.06E+05	1.05
Muestra 2	2.42E+06	1.00E-02	8.38
Muestra 3	2.99E+05	1.00E-02	7.48
Muestra 4	3.26E+05	1.00E+02	3.51
Muestra 5	2.42E+06	1.00E+02	4.38
Muestra 6	2.42E+06	2.91E+04	1.92
Muestra 7	2.42E+06	1.60E+03	3.18
Muestra 8	2.42E+06	1.00E+02	4.38
Muestra 9	2.42E+06	1.00E+02	4.38
Muestra 10	2.42E+06	0.00E+00	0.00

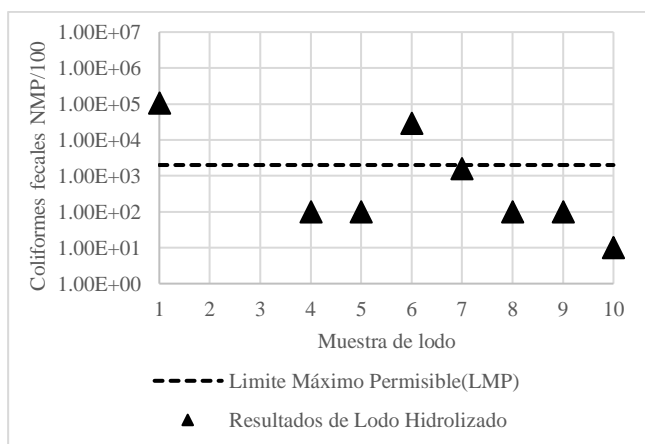
Fuente: Adaptado de Salinas y colaboradores (2022)

**Figura 3: Gráfica de coliformes fecales en lodos preespesados y limite permitido por la COPANIT 47-2000.**



Fuente: Adaptado de Salinas y colaboradores (2022)

**Figura 4: Gráfica de coliformes fecales en lodos hidrolizados y limite permitido por COPANIT 47-2000.**



Fuente: Adaptado de Salinas y colaboradores (2022)

En la tabla 4 se observan los resultados obtenidos del análisis de sólidos totales realizado a las diez muestras de lodos preespesados e hidrolizados.

**Tabla 4: Resultados de solidos totales para lodos preespesados e hidrolizados.**

Número de muestra	Sólidos totales		Disminución sólidos totales
	Preespesados	Hidrolizados	
	ST (mg/l)	ST (mg/l)	
Muestra 1	14,285	7,705	46%
Muestra 2	10,450	4,760	54%
Muestra 3	14,340	3,700	74%
Muestra 4	12,885	3,700	71%
Muestra 5	12,840	7,280	43%
Muestra 6	12,800	7,280	43%
Muestra 7	13,020	7,400	43%
Muestra 8	11,420	2,565	78%
Muestra 9	10,430	4,700	55%
Muestra 10	12,700	6,200	51%

La tabla 5 muestra el resultado de la determinación de sólidos volátiles realizado a las diez muestras de lodos preespesados e hidrolizados.

**Tabla 5: Resultados de solidos volatiles para lodos preespesados e hidrolizados.**

Número de muestra	Sólidos volátiles		Disminución sólidos volátiles
	Preespesados	Hidrolizados	
	SV (mg/L)	SV (mg/L)	
Muestra 1	11,945	4,605	61%
Muestra 2	6,595	3,590	46%
Muestra 3	10,935	3,545	68%
Muestra 4	10,270	3,120	70%
Muestra 5	7,994	4,863	39%
Muestra 6	7,840	4,710	40%
Muestra 7	7,128	4,751	33%
Muestra 8	8,770	1,950	78%
Muestra 9	8,115	3,745	54%
Muestra 10	7,620	3,720	51%

En la tabla No. 6 se presentan los datos obtenidos de la determinación de metales pesados en diez muestras de lodos digeridos obtenidas en el período del año 2016 al año 2022 como datos históricos de la PTAR de Panamá.

**Tabla 6: Registro histórico de metales pesados en lodos digeridos de la PTAR.**

Metales pesados	Unidad	M. 1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5	M. 6	M. 7	M. 8	M. 9	M. 10
		Ene-16	May-16	Nov-16	May-17	Feb-19	Nov-21	Dic-21	Ene-22	Feb-22	Abr-22
Arsénico	mg As/kg	ND	ND	ND	ND	<0.02620	<0.0262	<0.0262	<0.0262	<0.0262	<0.0010
Cadmio	mg Cd/kg	0.0028	0.0028	0.0028	0.4990	0.8376	0.5012	1.2783	1.0074	1.5946	0.0010
Cobre	mg Cu/kg	7.5400	3.3000	0.0048	124.1200	99.0460	75.1430	111.1500	115.9900	119.1200	147.0000
Cromo Total	mg Cr/kg	0.6450	0.6450	0.6450	21.3100	16.0990	10.9830	13.2010	9.4292	8.5472	15.4000
Níquel	mg Ni/kg	0.0750	0.0750	0.0750	14.7400	9.4565	8.1815	11.8940	9.5033	8.0598	90.4000
Mercurio	mg Hg/kg	<0.0010	<0.0010	0.0010	0.0010	<0.0037	<0.0037	<0.0037	<0.0037	<0.0037	<0.0010
Plomo	mg Pb/kg	0.0300	0.0300	0.0300	19.1900	6.7623	7.9856	7.6198	7.2972	8.1810	15.9000
Zinc	mg Zn/kg	23.0000	52.1100	0.2450	839.1000	538.9400	355.2900	469.4800	501.6600	532.9600	834.0000
Molibdeno	mg Mo/kg	ND	ND	ND	ND	1.624200	2.1334	2.5443	2.5443	2.8727	3.5100
Selenio	mg Se/kg	ND	ND	ND	ND	1.0534	<0.0262	<0.0262	<0.0262	<0.0262	2.9000

M = Muestra

ND = No Determinado

Fuente: reportes de laboratorio PTAR Panamá 2016-2022.

Tomando los datos históricos de metales pesados que se mostraron en la tabla 6, se determinó el valor medio de estos, los cuales se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7: Valor promedio de metales pesados en lodos digeridos correspondientes al período 2016-2022.**

Metales pesados	Unidad	Valor Promedio
Arsénico	mg As/kg	0.022
Cadmio	mg Cd/kg	0.870
Cobre	mg Cu/kg	111.242
Cromo Total	mg Cr/kg	12.277
Níquel	mg Ni/kg	22.916
Mercurio	mg Hg/kg	0.003
Plomo	mg Pb/kg	8.958
Zinc	mg Zn/kg	538.722
Molibdeno	mg Mo/kg	2.538
Selenio	mg Se/kg	1.977

## Discusión de resultados

La tabla 2 muestra los resultados de la determinación de pH realizados en este estudio, en estos se aprecia una disminución del pH, mismo que fue comprobado al realizar el análisis estadístico de medias entre el valor de pH de lodos preespesados y posterior

al proceso de hidrólisis térmica el cual dio como resultado una disminución de 5.8. Esta disminución favorece la eliminación de bacterias tal y como lo indica Iañez (2005) atribuyéndose este decremento a la descomposición de la materia orgánica que se da en la hidrólisis térmica como lo expresa Cárdenas y colaboradores (2016). El resultado obtenido indica una diferencia significativa menor del 5% entre el pH obtenido del lodo hidrolizado con respecto al lodo preespesado.

De los resultados obtenidos de la tabla 4 se obtuvo una disminución en sólidos volátiles del 40 al 60 %, con una media de 3859 mg/L en los lodos hidrolizados, y una desviación estándar de 1,000 mg/L, esto da una diferencia significativa menor del 5% comparado con los sólidos volátiles de los lodos preespesados. Esto quiere decir que, se va a tener menor volumen de lodos generados, debido a que se ha volatilizado gran cantidad de materia orgánica antes de entrar a los digestores.

Al analizar los resultados obtenidos de coliformes fecales del estudio de Salinas y colaboradores (2022) para lodos hidrolizados existe una disminución de al menos 4.0  $Log_{10}$  en coliformes fecales. La mayoría de los reportes obtenidos de cada muestra se encuentra por debajo del límite máximo permisible permitido por la COPANIT 47-2000. Desde el punto de vista de la salud



pública, esta diferenciación es importante, puesto que permite asegurar con alto grado de certeza que la contaminación presente en los lodos es de origen fecal, según lo expresa Salinas y colaboradores (2022).

En el estudio presentado por Salinas y colaboradores (2022) todas las muestras analizadas de lodos preespesados tienen alto contenido de coliformes fecales en un rango superior a  $1 \times 10^6$  NMP/100, (ver figura 3). Es importante tomar en consideración que estos lodos preespesados presentan una alta concentración de organismos patógenos causantes de enfermedades.

La hidrólisis térmica logra la reducción de coliformes fecales por debajo del límite permisible establecido en la norma COPANIT 47-2000 (2,000 NMP/100 ml), valor alcanzado en 6 de las 10 muestras del estudio realizado por Salinas y colaboradores (2022).

Los lodos hidrolizados en coliformes fecales presentan una diferencia significativa menor del 5% con el grupo de lodos preespesados. En conjunto se tiene una media de 13,500 NMP/100 de bacterias en los lodos hidrolizados con una desviación estándar de 33,000 NMP/100 recordando que nos referimos a organismos vivos contabilizados.

En la presente investigación se visualizó que el lodo orgánico proveniente de la PTAR de la ciudad de Panamá está por debajo del límite permitido.

## Conclusiones

El proceso de hidrólisis térmica es aplicado como un tratamiento antes de la digestión anaerobia de lodos orgánicos, utilizado con el objetivo de mejorar la calidad de los lodos, entre otros.

La hidrólisis térmica influye positivamente en la calidad de los lodos generados en la PTAR en parámetros físicos como los sólidos volátiles y microbiológicos como los coliformes fecales, permitiendo alcanzar los límites permisibles, según la norma COPANIT 47-2000 para parámetros como coliformes fecales establecido este límite en 2,000 NMP/100 ml, según se aprecia en el estudio realizado por Salinas y colaboradores (2022).

Los lodos orgánicos, al ser sometidos por el proceso de hidrólisis térmica, presentan una remoción del 99.9% de coliformes fecales, tomando como referencia las muestras tomadas en donde se estableció un 95% de posibilidad de ocurrencia.

Los resultados de esta investigación muestran una diferencia significativa menor del 5% entre el pH obtenido del lodo hidrolizado con el lodo preespesado.

La disminución del pH muestra que, al utilizar la hidrólisis térmica, se está adelantando el proceso de hidrólisis que se debería dar en el digestor anaeróbico, debido a la secuencia metabólica de los grupos microbianos.

En los resultados obtenidos se aprecia una disminución del pH, mismo que fue comprobado al realizar el análisis estadístico de medias entre el valor de pH de lodos preespesados y posterior al proceso de hidrólisis térmica el cual dio como resultado una diferencia de 5.8 unidades de pH.

En las pruebas realizadas en sólidos volátiles, se aprecia que existe una disminución 40 al 60 % de estos, lo que implica que se tendrá menor volumen de lodos, debido a que se ha volatilizado gran cantidad de materia orgánica antes de entrar a los digestores. Este porcentaje se logró con una diferencia significativa menor del 5% comparado con los sólidos volátiles de los lodos preespesados.

## Agradecimientos

La autora agradece a los encargados de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Panamá por su disposición para la toma de muestras de los lodos. Al grupo de investigación de Biosólidos: Energía y Sostenibilidad del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá.

## Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos del autor y al apoyo de la Universidad Tecnológica de Panamá.

## Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

## Como citar este documento

Salinas Guerra, A.K. (2023). Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los lodos de la PTAR de la Ciudad de Panamá por la influencia del proceso de hidrólisis térmica (THP). *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(1), Artículo e 1548.  
<https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i1.1548>

## Consentimiento informado

No aplica.

## Contribuciones de autor

Conceptualización, trabajo de campo, tabulación, análisis y escritura: A.K.S.G.

## Referencias

- Abu-Orf, M., & Goss, T. (2012). Comparing thermal hydrolysis processes (CAMBI™ an EXELYS™) for solids pretreatment prior to anaerobic digestion. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012(1), 1024-1036.  
[https://www.researchgate.net/publication/272221844\\_Comparing\\_thermal\\_hydrolysis\\_processes\\_CAMBI\\_and\\_EXELYS\\_for\\_solids\\_pretreatment\\_prior\\_to\\_anaerobic\\_digestion](https://www.researchgate.net/publication/272221844_Comparing_thermal_hydrolysis_processes_CAMBI_and_EXELYS_for_solids_pretreatment_prior_to_anaerobic_digestion)
- Abu-Orf, M., Pound, C., Sobeck, R., Locke, E., Benson, L., Bailey, W., Peot, C., Sultan, M., Carr, J., Kharkar, S., Murthy, S., Derminassian, R., Shih, G. (2009). DC WASA adopts thermal hydrolysis for anaerobic digestion pretreatment: conceptual design details for the largest Cambi™ System. *Proceedings of the Water Environmental Federation*, 18(1), 179-192.  
[https://www.researchgate.net/publication/233554575\\_DC\\_WASA\\_Adopts\\_Thermal\\_Hydrolysis\\_for\\_Anaerobic\\_Digestion\\_Pretreatment\\_Conceptual\\_Design\\_Details\\_for\\_the\\_Largest\\_Cambi\\_System](https://www.researchgate.net/publication/233554575_DC_WASA_Adopts_Thermal_Hydrolysis_for_Anaerobic_Digestion_Pretreatment_Conceptual_Design_Details_for_the_Largest_Cambi_System)
- Acuerdo Gubernativo DGNTI-COPANIT 47-2000, Dirección General de Normas y Tecnología Industrial. (2000). *Agua, Usos y Disposición Final de Lodos*. Panamá.
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46(1), 1-10.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181642434003>
- American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA] and Water Environment Federation [WEF]. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Lipps W.C, Braun Howland E.B, Baxter, T.E. Editors. 24<sup>th</sup> Edition. Washington D.C: APHA Press.
- American Water Chemicals. Inc. (2022). *Hidrólisis Térmica. American Water Chemicals, Perfecting the Science of Membrane Treatment*. Recuperado el 10 de marzo de 2023 de  
<https://www.membranechemicals.com/es/water-treatment/hidrolisis-termica/>
- Barber, B., Nilsen, P.J., & Christy, P. (2022). *Cambi solidstream: Thermal hydrolysis as a pre-treatment for dewatering to further reduce operating costs*. Cambi. Recuperado el 10 de marzo de 2023 de  
<https://www.cambi.com/resources/literature/cambi-solidstream-thermal-hydrolysis-as-a-pre-treatment-for-dewatering/>
- Cárdenas Cleves, L.M, Parra Orobio, B.A., Torres Lozada, P., & Vásquez Franco, C.H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano -BPM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. 97. *Revista ION*, 29(1), 95-108.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- Cárdenas Torrado, G. & Molina Pérez, F. J. (2022). Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Ingeniería*, 27(3), Article e 17945.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.14483/23448393.17945>
- Fernández Polanco, D. (2023). *Casos prácticos de digestión avanzada de lodos de EDAR mediante tecnología de Hidrólisis Térmica* (Presentación de casos). Jornada “El Biometano en la transición ecológica” Santander 31 de marzo.  
<https://tech4plus.com/publicaciones/hidrolisis-termica-tech4plus/Casos%20practicos%20de%20digestion%20avanzada%20de%20lodos%20de%20>

- [EDAR%20mediante%20tecnologia%20de%20hidrolisis%20termica.pdf](https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i1.1548)
- Gahlot, P., Balasundaram, G., Tyagi, V.K., Atabani, A.E., Suthar, S., Kazmi, A.A., Štěpanec, L., Juchelková, D., Kumar, A. (2022). Principles and potential of thermal hydrolysis of sewage sludge to enhance anaerobic digestion. *Environmental Research*, 214(2), Article e 113856.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113856>
- Galindo Valeriano, C. (2010). *Estudio, caracterización de lodos provenientes de fosas sépticas*. [Tesis de maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0394\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0394_MT.pdf)
- García Cascallana, J., Barrios, X.G., & Martínez, E.J. (2021). Thermal hydrolysis of sewage sludge: A case study of a WWTP in Burgos, Spain. *Applied Sciences*, 11(3), Article e 964.  
<https://doi.org/10.3390/app11030964>
- Han, Y., Zhuo, Y., Peng, D., Yao, Q., Li, H., & Qu, Q. (2017). Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation characteristics of high solid anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 244(1), 836-843.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.166>
- Iañez Pareja, E. (2005). *Microbiología General*. España. Departamento de Microbiología, Universidad de Granada.
- Khakbaz, A., De Nobili, M., Mainardis, M., Contin, M., Aneggi, E., Mattiussi, M., Cabras, I., Busut, M., & Goi, D. (2020). Monitoring of heavy metals, EOX and LAS in sewage sludge for agricultural use: a case study. *Detritus, Multidisciplinary Journal for Waste Resources & Residues*, 12(1), 160-168.  
<https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13993>
- Martín Arroyo, P. (2015). *Tecnologías comerciales de hidrolisis térmica de lodos de depuradora: revisión documental y comparativa*. [Tesis de Maestría, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].  
<https://core.ac.uk/download/pdf/211097391.pdf>
- Medina Herrera, M. (2010). *Optimización del tratamiento de residuos provenientes de rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C].  
<http://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/347>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (1995). *Guías para la calidad del agua potable*. Volumen 1.  
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/37736>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. 4ª edición + 1ª adenda.  
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/272403>
- Rodríguez Torres, J. (2013). *Propuesta metodológica para tratamientos de lodos provenientes de plantas de potabilización en la Sabana de Bogotá (Estudio de caso Madrid, Cundinamarca)*. [Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre de Bogotá].  
<https://core.ac.uk/download/pdf/198450326.pdf>
- Salinas A, Ramirez M, Deago E, Espino K. (2022) *Efecto de la Hidrolisis Térmica para la Inactivación de los Coliformes Fecales presentes en los lodos de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Panamá*. 8th International Engineering, Science and Technology Conference (IESTEC). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEE).  
<https://doi.org/10.1109/IESTEC54539.2022.00087>
- Suez International S.A. (2019). *Memoria técnica Planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Panamá*. Panamá.