

# 1



---

**INGENIERÍA,  
DOCENCIA  
E INVESTIGACIÓN**

---

**Determinación  
de las constantes  
cinéticas  
y estequiométricas  
en un biorreactor  
de lodos activados  
convencional  
a escala  
(Laboratorio para las  
aguas residuales  
de un frigorífico)**

Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina  
ISSN 0124-8170, N<sup>o</sup> 13  
(Págs. 9 - 16)

---

TATIANA RODRÍGUEZ CHAPARRO MSC.<sup>1</sup>  
EDDIE ALBERT PÉREZ NAVARRETE\*\*  
ENEYDI VIVAS MORA

## Resumen

El proceso de lodos activados presenta eficiencias altas (85-95%) (1) en cuanto a reducción de la materia orgánica; implementarlo en escala laboratorio es una técnica fácil y económica que brinda la posibilidad de usar y utilizar los resultados en el diseño de sistemas de tratamiento (2). Para realizar este trabajo se utilizó el proceso de lodos activados de tipo mezcla completa con flujo continuo que se diseñó, construyó, y operó en el laboratorio de calidad de aguas de la Universidad Militar Nueva Granada. El biorreactor constó de una cámara de aireación, un sedimentador, y una fuente de alimentación con agua residual de un Frigorífico en Bogotá, Colombia.

La investigación se desarrolló durante tres meses, en dos fases. En la primera fase se aclimataron los lodos para obtener una concentración de biomasa

---

<sup>1</sup> *Ingeniera Civil, Magister en Ingeniería Civil - Ambiental de la Universidad de Los Andes. Docente de tiempo completo Universidad Militar Nueva Granada, Programa de Ingeniería Civil*

<sup>\*\*</sup> *Estudiantes de décimo semestre, Programa de Ingeniería Civil*

alta que permitiera operación en flujo continuo, la segunda fase consistió en operar el biorreactor con la biomasa aclimatada anteriormente a diferentes edades de lodos para poder calcular las constantes cinéticas y estequiométricas.

El biorreactor se operó con tiempo de retención hidráulica constante de ocho horas, y edad de lodos variable (5, 10 y 15 días). El control del sistema se realizó con la determinación diaria del pH y la temperatura y la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos volátiles (SSV) cada tres días.

Con los valores encontrados se determinaron: las constantes cinéticas y estequiométricas, y la eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DBO.

*Palabras clave:* Cinética, estequiometría, biorreactor, edad de lodos, lodos activados.

## Summary

The activated sludge process is the one of the most efficient process, when it comes to removal of organic matter. Implementing in the lab is quite easy, economic technically feasible, and simultaneously offers the possibility of using the results obtained in the lab to be applied in field by determining the kinetic and stochiometric constants.

The activated sludge system was designed, built and operated in the water quality lab, at the Military University in Bogotá, Colombia. The bio-reactor has an aeration chamber, a sedimentation tank and a feeding source with waste water taken from "a meat-packing planta" in Bogotá. The research was carried out for 3 months, in two stages as follows: In the first stage and in order to obtain a high concentration of biomass the acclimatizing process was carried out. This step allows the bioreactor to run in a continuous flow. In the

second stage, the bio-reactor was taken in to operation and fed with the acclimated sludge at different sludge ages. This would allow us to determine the kinetics, and the stochiometric constants.

The bio-reactor was ran with a hydraulic retention time of 8 hours and for different sludge ages (5, 10, and 15 days). The system was monitored with a daily grab samples, and pH, temperature as well as the DBO<sub>5</sub> and suspended volatile solids were determined.

*Key words:* kinetics, stochiometric, bioreactor, sludge age, activated sludge.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento biológico de las aguas residuales tiene como objetivo principal estabilizar la materia orgánica; sin embargo, para llevarlo a cabo es fundamental determinar las constantes cinéticas y estequiométricas propias del agua residual que se esté tratando.

Las aguas residuales industriales tienen características físico-químicas y biológicas variables, lo cual influye en el proceso de diseño, ya que no se puede generalizar un sistema de tratamiento.

Revisando investigaciones en el tema se encontraron autores como OROZCO, ECKENFELDER, LAWRENCE y MCCARTY, que han desarrollado estudios en diferentes tipos de aguas residuales industriales con el fin de determinar constantes cinéticas y estequiométricas para diseñar sistemas de tratamiento propios en cada una de ellas.

La industria frigorífica no ha sido objeto de estudios en este sentido. Las aguas residuales producidas se someten en algunas ocasiones únicamente a tratamientos físico-químicos que no aseguran la remoción completa de los contaminantes presentes.

En este sentido, la línea de investigación en aguas residuales de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada ha venido desarrollando investigaciones en modelos físicos a escala laboratorio en donde con aguas residuales de un frigorífico se han determinado las constantes cinéticas y estequiométricas  $K, K_s, K_m, K_o, K_1, K_2, K_e$  utilizando el proceso de lodos activados. En esta investigación se trabajó con lodos activados de mezcla completa con flujo continuo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El punto de partida de la investigación fue la caracterización del efluente del frigorífico; esta caracterización se llevó a cabo mediante muestras compuestas realizadas a lo largo de una semana una vez finalizado el proceso industrial.

Las muestras recolectadas fueron almacenadas, preservadas y procesadas según recomendaciones del estándar methods (4).

En la tabla 1 se muestran los resultados de esta caracterización

Luego de la caracterización se llevó a cabo la primera fase de la investigación en el aclimatador de lodos, en el cual se produce la biomasa necesaria para el arranque del biorreactor.

El aclimatador es un frasco de vidrio con capacidad de 4L que opera como reactor tipo batch, en donde se produce mezcla completa por la aireación que se le inyecta en forma homogénea (5). Esta fase tiene como objetivo acumular una concentración entre 2000 y 2500 mg/l de SSV (sólidos suspendidos volátiles) que permitirán hacer el arranque del biorreactor con flujo continuo.

La segunda fase se refiere a la operación del biorreactor una vez se obtiene la suficiente biomasa en la aclimatación; esta fase se experimenta con

Tabla 1. Resultados de la Caracterización del Agua Residual del Frigorífico

Características físicas	Unidad	Valores
Conductividad	us/cm	0.95
Aceites y grasas	mg/l	1646.60
Sólidos totales	mg/l	3333.33
S. totales fijos	mg/l	542.86
S. totales volátiles	mg/l	2790.47
S. disueltos totales	mg/l	1300.00
S. disueltos fijos	mg/l	342.86
S. disueltos volátiles	mg/l	957.14
S. suspendidos totales	mg/l	2033.33
S. suspendidos fijos	mg/l	1833.33
S. suspendidos volátiles	mg/l	200.00
Temperatura	°C	18.60
Turbiedad	UNT	140
<b>Características biológicas</b>		
DBO <sub>5</sub> <sup>20</sup>	mg/l	2298.0
DQO	mg/l	11736.53
Oxígeno disuelto	mg/l	1.0
Coliformes totales	UFC/100ml	58*10 <sup>5</sup>
Coniformes fecales	UFC/100ml	27*10 <sup>4</sup>
<b>Características químicas</b>		
Alcalinidad	mg/l	8.30
Amonio	mg/l	0.20
Fosfatos	mg/l	75.0
Nitratos	mg/l	20.0
Nitritos	mg/l	0.64
pH	mg/l	7.44
Sulfatos	mg/l	460.0
Sulfitos	mg/l	17.50

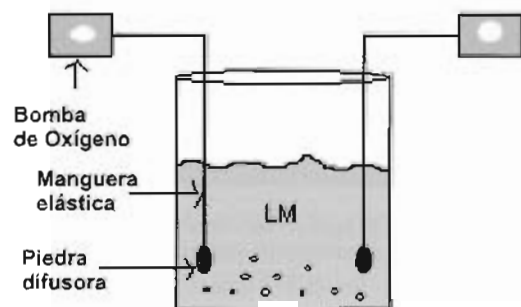
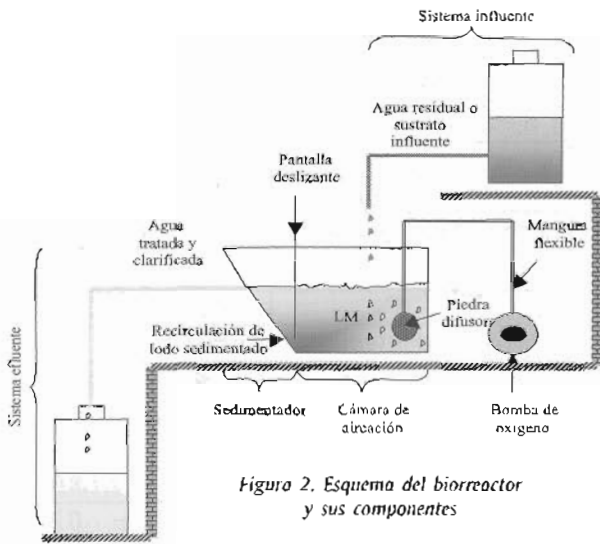


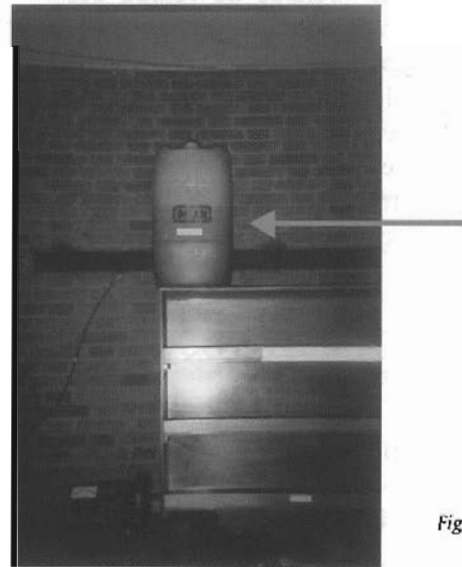
Figura 1. Aclimatador de lodos

diferentes edades de lodos (5, 10 y 15 días) y con tiempo de detención hidráulica de 8 horas.

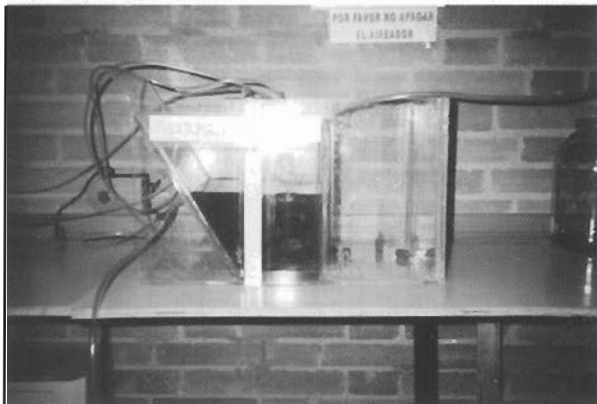
El biorreactor fue construido en acrílico con las siguientes dimensiones: 28 cm de alto, 28.5cm de largo (12 cm para la cámara de aireación y 16.5 cm para el sedimentador y 25 cm de ancho; se utilizó una pantalla deslizante de 0.5 cm de espesor, 35 cm de alto y 24 cm de ancho para separar la cámara de aireación del sedimentador.



de vidrio para regular el caudal. Este caudal fue introducido al biorreactor por gravedad.



El sistema efluente está compuesto por un racor de bronce de ¼" ubicado en la pared inclinada del sedimentador que permite la salida del agua clarificada. Este racor se conecta con una manguera de 1.5 m que conduce el agua a un galón con capacidad de almacenamiento de 18L. (5)



El sistema influente está constituido por un galón de 50 L, 2m de manguera flexible y una válvula



La aireación del sistema se llevó a cabo con 3 bombas de oxígeno de una y dos salidas y siete piedras difusoras colocadas en el fondo de la cámara de aireación.

El biorreactor con flujo continuo, y recirculación de lodos se controló con la pantalla separadora; el agua clarificada pasaba al sedimentador y finalmente salía hacia el tanque efluente con el fin mantener el caudal de operación. Los lodos producidos en la degradación de la materia orgánica decantados en el sedimentador no fueron sometidos a ningún tratamiento.

El control del proceso se realizó utilizando el caudal de purga ( $Q_w$ ) de acuerdo con el siguiente orden:

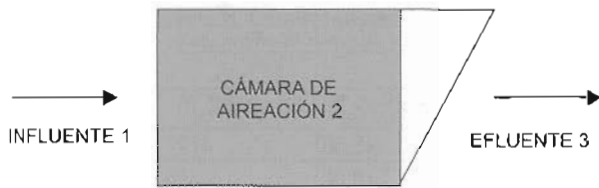


Figura 6. Puntos de control del proceso

- Punto 1 y 3: tres veces por semana  
Parámetro: DBO
- Punto 1, 2 y 3: tres veces por semana  
Parámetro: SSV
- Punto 2: diariamente  
Parámetro: pH,  $T^\circ$ ,  $Q_w$

El caudal de purga ( $Q_w$ ) controla la edad de lodos o tiempo de residencia celular dentro del reactor, el cual se determina mediante la ecuación.

$$Q_w = \frac{V_{\text{reactor}}}{\theta_c} \quad (1)$$

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 2 se aprecian los resultados obtenidos en la fase de aclimatación. En esta fase se debía

mantener el pH entre 6.5 y 7.5 con el fin de garantizar el crecimiento de la biomasa en forma estable. La temperatura no tuvo variaciones significativas.

La concentración de SSV se mantuvo siempre en fase de crecimiento exponencial, indicando que había buenas condiciones dentro del aclimatador que permitieron llegar al valor esperado de biomasa (3000- 4000 mgSSV/l)

Período	pH	$T^\circ$ (°C)	SSV (mg/l)	DBO5 (mg/l)
Feb 8/02	7,78	16,3	350,0	1596,0
Feb 15/02	6,95	16,6	200,0	1206,0
Feb 22/02	7,31	18,2	891,7	1134,0
Mar 01/02	7,41	18,1	3063,6	-----
Mar 06/02	7,60	18,0	4000,0	-----

Tabla 2. Valores promedios de la fase de aclimatación

En la tabla 2 se aprecia que los parámetros  $DBO_5$ , SSV y pH son los que permiten hacerle un control estricto al biorreactor; dentro de ellos el pH es el determinante del crecimiento bacteriano. En algunas ocasiones el valor de pH fue alto, lo cual influyó en la concentración de microorganismos, haciendo que disminuyera notablemente, generando valores bajos de remoción de materia orgánica y eficiencias, ya que no había suficiente biomasa para degradar la materia orgánica.

El tamaño de la muestra en esta fase fue de 29 días, permitiendo esto tener un mayor grado de confiabilidad en los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros controlados.

Los resultados promedio de eficiencia de remoción de  $DBO_5$  para edades de lodos entre cinco y quince días estuvieron en el rango de 68% a 72% y de SSV entre 62% y 85%.

Además de los parámetros de control se realizó una medición de coliformes totales y fecales en la última edad de lodos (15 días) en el punto 1 y 3 del biorreactor, donde se obtuvieron eficiencias de remoción superiores a 90% (ver tabla 3).

$\theta_c$ (días)	DBO <sub>o</sub> (mg/l)	DBO <sub>e</sub> (mg/l)	UFC/100ml C <sub>to</sub>	UFC/100ml C <sub>te</sub>	C <sub>to</sub> UFC/100ml	C <sub>te</sub> UFC/100ml	DBO %Rem	CF %Rem	CT %Rem
5	1317,38	375,38					71,51		
10	1273,29	360,86					71,66		
15	1579,71	376,71	16*105	89*103	33*105	12*104	76,15	94,4	96,4

Tabla 3. Resultados de los parámetros de control y eficiencias obtenidas

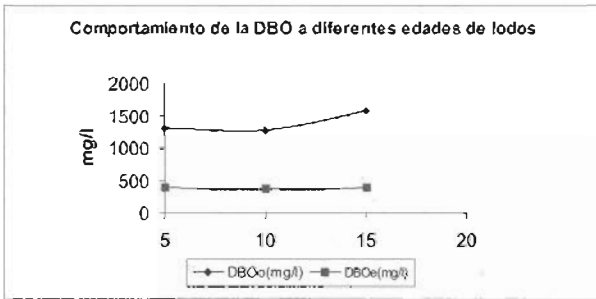


Figura 7. Comportamiento de la DBO a diferentes edades de lodos

Se puede apreciar en la tabla 3 y en la figura 7 que a medida que aumenta la edad de lodos, aumenta la remoción de DBO<sub>5</sub>; esto se debe a que al aumentar  $\theta_c$  se disminuye la concentración de sustrato efluente y aumenta la producción de biomasa.

Para determinar las constantes cinéticas y estequiométricas se utilizaron valores promedios de los parámetros de control para cada edad de lodos. El S<sub>o</sub> (sustrato en el afluente, mgDBO<sub>5</sub>/l), el S (sustrato en el efluente, mgDBO<sub>5</sub>/l) y la X (concentración de biomasa en el reactor, mgSSV/l) promedio se observan en la tabla 3.

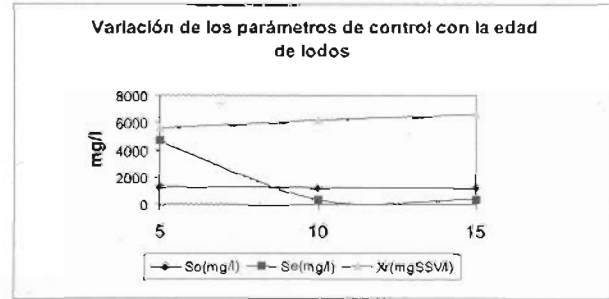


Figura 8. Variación del Sustrato y la Biomasa respecto a las diferentes edades de lodos

$\theta_c$ (días)	S <sub>o</sub> (mgDBO <sub>5</sub> /l)	S(mgDBO <sub>5</sub> /l)	X(mgSSV/l)
5	1.348,50	4727	5.648,61
10	1.278,00	360	6.222,22
15	1.230,00	345	6.586,67

Tabla 4. Valores promedio de los parámetros de control

Una vez seleccionados los valores, se calculan las constantes gráficamente aplicando las siguientes ecuaciones:

Coefficientes cinéticos y estequiométricas	Unidad	Eckenfelder	McKinney	Orozco
K	mgSSV/l	$S_o - S$ vs $S$ $X * \theta$		
K <sub>s</sub>	1/d		$S_o - S$ vs $S$ $\theta$	
K <sub>m</sub>	mg/l			$X * \theta$ vs $1$
K <sub>o</sub>	1/d			$S_o - S$ vs $S$
K <sub>1</sub>	1/d			$X * \theta$ vs $X$
K <sub>2</sub>	1/d			$S_o - S$ vs $S$
K <sub>e</sub>	1/d		$1$ vs $S_o - S$	
Y	mgSSV/mgDBO		$\theta_c$ vs $X * \theta$	

Tabla 5. Ecuaciones empleadas para el cálculo de las constantes según diferentes autores

Las constantes cinéticas y estequiométricas varían entre sí debido a las características de la industria; para el caso del frigorífico, los resultados que se obtuvieron no se pueden comparar con otros valores ya que en esta industria y con este tipo de biorreactor no se han realizado ensayos. En la tabla 5 se observan las constantes calculadas en esta experimentación.

Coefficientes cinéticos y estequiométricos	Unidad	Eckenfelder	McKinney	Orozco
K	MgSSV/l	0,0009		
Ks	1/d		0,9764	
Km	mg/l			1.929,70
Ko	1/d			2,7333
K1	1/d			0,9203
K2	1/d			0,0653
Ke	1/d			0,5732
Y	mgSSV/mgDBO			1,5626

Tabla 6. Constantes cinéticas y estequiométricas de una industria frigorífica

En la tabla 6 se presentan las constantes cinéticas y estequiométricas que se han encontrado a partir de otros tipos de agua residual industrial (3).

Los anteriores resultados permiten tener un punto de comparación con los ya obtenidos en otras industrias respecto de la utilidad de las diferentes ecuaciones y sus proponentes; para el caso se tiene que la ecuación que más constantes permite identificar es la de Orozco que actúa tanto en condiciones de abundancia como de inanición. Sin embargo hay que resaltar que los resultados obtenidos durante la investigación son experimentales y están sujetos a verificaciones en futuras investigaciones.

Agua Residual	Ecuación	Base	KL (d-1)	K mgSSV/l-dia	Ko d-1 (mg/l)	Km	K1 (d-1)	K2	Y (mgSV/mg)	Kd (d-1)
Doméstica	Lawrence McCary	DQO			5.6	22			0.67	0.070
Leche descremada	Lawrence McCary	DBO			5.1	100			0.48	0.045
Doméstica	Lawrence McCary	DBO							0.50	0.055
Curtiembre	Orozco	DBO					0.763	0.1700	1.19	0.080
Textiles	Orozco						0.033	0.017	0.38	0.084
Textiles	Laguna		2.50							
Pulpa y papel	Laguna	DBO	0.26							
Efluente plantas	Laguna	DBO	0.37							
Domésticas	Eckenfelder	DBO		0.01-0.03					0.73	0.075
Refinería	Eckenfelder	DBO							0.49-0.62	0.015
Cervecería	Eckenfelder	DBO							0.56	0.015
Pulpa Kraft	Eckenfelder	DBO							0.50	0.080
Química y petroquímica	Eckenfelder	DBO							0.31-0.72	0.120

Tabla 7. Constantes cinéticas y estequiométricas de diferentes tipos de agua residual



## CONCLUSIONES

Las constantes cinéticas y estequiometricas encontradas partir de la ecuación de Orozco fueron:

$$K = 0.0009 \text{ mg/l}, K_s = 0.9764 \text{ d}^{-1}, K_m = 1929.7 \text{ mg/l}, K_o = 2.733 \text{ mg/l}, K_1 = 0.9203 \text{ d}^{-1}, K_2 = 0.0653 \text{ d}^{-1}$$

$$K_e = 0.5732 \text{ d}^{-1}, Y = 1.5626 \text{ mgSSV/mgDBO}$$

Al comparar los resultados de las constantes para el frigorífico, con los realizados por autores como Lawrence, Mc-Carty, Eckenfelder y Orozco, se observa que no hay similitud con ninguna de ellas; esto es lógico ya que cada tipo de agua residual tiene un comportamiento diferente frente a la cinética, estequiometría y al tratamiento que se esté desarrollando.

Se obtuvo una eficiencia de remoción de coliformes totales y fecales superior a 90%

La eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  no cumplió con los requisitos especificados en la norma RAS -2000 (85% - 95%), sin embargo, la eficiencia obtenida varió en un rango cercano (59% - 86%).

El método utilizado para determinar las constantes fue el apropiado, ya que se tuvieron en cuenta todos los parámetros que intervienen en la operación y el control del biorreactor.

Los resultados obtenidos durante esta investigación deben ser verificados experimentalmente con el mismo tipo de agua, variando los tratamientos y parámetros de diseño.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000. Título E.
- (2) CORREA, Carolina. Constantes cinéticas en un sistema de lodos activados a escala laboratorio. Memorias XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2000. Sao Paulo. Brasil
- (3) OROZCO JARAMILLO, Álvaro; SALAZAR ARIAS, Álvaro. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Acodal. Reimpresión 2001. 473p.
- (4) A.P.H.A., A.W.W.A., W.P.C.F. Standards Methods for the examination of water and wastewater. Edición 16. 1268p
- (5) PÉREZ, Albert Eddy; VIVAS, Eneydi. Diseño y Operación de un Reactor Aerobio Piloto para Tratar Aguas Residuales Industriales. Tesis de Grado. Universidad Militar Nueva Granada. 2002.