

**Resumen**

En el presente trabajo se aplican dos modelos matemáticos a los resultados de volúmenes de metano generado en un proceso anaerobio, en reactores de mezcla completa con empleo de soportes arcillosos (saponita, zeolita, sepiolita calcinada y esmectita aluminica) que favorecen la adhesión de los microorganismos, ya desarrollado en la Parte I de este artículo. Ambos modelos, de Roediger y de Quiroga-Sales, se ajustan por igual a la evolución de la producción de metano con el tiempo, si bien este último permite obtener mayor información de los parámetros del proceso. Los valores de las constantes específicas de velocidad, obtenidas por ambos modelos, se encuentran en torno a los 0.2 y 0.6 días<sup>-1</sup>, siendo el reactor con soporte Esmectita el que presenta los valores más altos.

**Palabras clave:**

Purines cerdo, Depuración anaerobia, Cinética, Soporte anclaje, Biogás, Metano.

**Abstract**

*The anaerobic treatment of pig sewage at 25 °C: the influence of the stabilising medium.*

*In this work two mathematical models have been applied. The experiment was based on the obtention of dates methane generated during an anaerobic purification of swine wastewater, using a complete mixed flow reactors with four kind of clayey supports (saponite, zeolite, sepiolite and esmectite) to permit better adhesion of the microorganisms, developed in Part I of this paper. Both models, of Roediger and Quiroga-Sales, fit to the results of production of methane with time, but the last one gave more information about the parameters of the process. The specific kinetic constant ranged from 0.2 to 0.6 d<sup>-1</sup>, esmectite being the one with the higher values.*

**Keywords:**

Pigs wastewater, anaerobic treatment, Kinetics, Immobilization support, Biogas, Methane.

# Depuración anaerobia de purines de cerdo a 25°C: Influencia del soporte de inmovilización

**II. Estudio Cinético**

Por: Montaña Durán Barrantes\*, Paloma Alvarez Mateos\*\* y Fernando Romero Guzmán\*\*

\* Instituto de la Grasa, CSIC. Avda. Padre García Tejero, n.º4. 41012 Sevilla.

\*\* Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad de Sevilla. C/ Prof. García González, s/n. 41012 Sevilla.  
E-mail: palvarez@cica.es.

**1. INTRODUCCIÓN**

Las cinéticas del crecimiento biológico están basadas en las siguientes relaciones fundamentales:

- Velocidad de crecimiento de los microorganismos.
- Velocidad de utilización del sustrato.
- Coeficiente de rendimiento y concentración de microorganismos.
- Velocidad de formación de producto.

En el caso de procesos complejos, es necesario distinguir entre las características que definen el proceso total y las que definen cada etapa, ya que la naturaleza y composición química de los residuos utilizados en la digestión anaerobia marcan los subprocesos de la degradación y los grupos de microorganismos implicados en la conversión anaerobia de estos residuos<sup>1</sup>.

**1.1. Crecimiento Microbiano****Ecuación de Monod**

Monod expresa la velocidad de crecimiento de los microorganismos

en función de su velocidad máxima y de la concentración de sustrato mediante la ecuación<sup>2</sup>:

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{K_s + S}$$

donde:

$\mu$ : velocidad inicial de crecimiento

$\mu_{max}$ : velocidad máxima por efecto de la saturación del sustrato

S: concentración de sustrato

$K_s$ : constante de saturación que equivale a la concentración de sustrato cuando  $\mu = 1/2 \mu_{max}$ .

**Ecuación de Contois**

Contois señala que la velocidad de crecimiento es función no sólo de la concentración de sustrato, sino también de la concentración de microorganismos<sup>3</sup>:

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S}{BX + S}$$

donde:

B: constante

X: concentración de microorganismos

**1.2. Consumo de Sustrato**

**Ecuación de Monod**

Monod muestra que la velocidad de reacción o de utilización del sustrato es proporcional a la concentración de microorganismos y de sustrato, pero que disminuye al aumentar la concentración de sustrato ("saturación"), por lo que tiende a un valor máximo que no puede sobrepasar. Su expresión matemática es<sup>2</sup>:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{k \cdot X \cdot S}{(K_s + S)}$$

donde:

$\frac{dS}{dt}$  : velocidad de eliminación del sustrato

k : constante de velocidad

**Función de Contois**

Contois, al aplicar la ecuación de Monod en presencia de elevadas concentraciones de biomasa, encontró que la constante de saturación  $K_s$  era proporcional a la concentración de sustrato en el influente<sup>3</sup> ( $S_0$ ). Por tanto:

$$K_s = a \cdot S_0$$

luego:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{k \cdot X \cdot S}{(a \cdot S_0 + S)}$$

donde:

a: constante empírica específica para cada tipo de sustrato

**Coefficiente de Rendimiento y Concentración de Microorganismos**

Para su crecimiento, los microorganismos utilizan parte del sustrato que transforman. Monod expresa el coeficiente de rendimiento, Y, mediante la ecuación<sup>2</sup>:

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt}$$

que relaciona la velocidad de formación de microorganismos en función de la eliminación del sustrato.

**1.3. Formación de Producto**

**Modelo de Primer Orden propuesto por Roediger**

El reactor anaerobio se puede considerar como un biorreactor en donde la materia orgánica del residuo, S, expresada en función de la Demanda Química de Oxígeno (g DQO/l), reacciona con la biomasa del sistema de concentración X (g sólidos en suspensión volátiles/l). La velocidad de eliminación de sustancia orgánica viene dada por<sup>4</sup>:

$$\frac{dS}{dt} = k \cdot S \cdot X \tag{1}$$

donde t es el tiempo (días) y k un coeficiente cinético (días<sup>-1</sup>).

Dado el pequeño valor del coeficiente de rendimiento celular ( $Y_{x/s}$ ) en la fermentación anaerobia (0,02-0,06 g de células/g DQO)<sup>5,6</sup>, y teniendo en cuenta que la variación de la DQO en el transcurso de un experimento es reducida, se puede admitir que X es aproximadamente constante. Esto permite simplificar la integración de la ecuación (1) definiendo una constante aparente  $k_0$ , mediante la expresión:  $k_0 = k \cdot X$ . Integrando la ecuación (1) con esta condición se obtiene:

$$S = S_0 \cdot e^{-k_0 \cdot t} \tag{2}$$

definiendo el coeficiente de rendimiento ( $Y_{p/s}$ ) para el producto formado (metano) como:

$$Y_{p/s} = \frac{dG}{dS} \tag{3}$$

e integrando se llega a la expresión:

*Los microorganismos*

*utilizan parte del*

*sustrato que*

*transforman*

$$G = G_m \left( 1 - e^{-k_0 \cdot t} \right) \tag{4}$$

donde:

$$G_m = S_0 \cdot Y_{p/s}$$

siendo:

G : volumen de metano acumulado en función del tiempo (ml)

$G_m$  : volumen de metano acumulado a tiempo infinito (ml)

$S_0$  : concentración inicial de sustrato (g DQO/l)

$k_0$  : constante específica aparente de velocidad (días<sup>-1</sup>)

La ecuación (4) indica que la producción de metano sigue un modelo cinético de primer orden<sup>7</sup>.

**Modelo de Quiroga y Sales**

Quiroga y Sales<sup>8</sup> al estudiar la degradación de tensioactivos en el medio marino, hallaron que la concentración de sustrato existente en el medio en cada instante viene representada por un polinomio de segundo grado:

$$V = -\frac{dS}{dt} = k_2 S^2 + k_1 S + S_0 \tag{1}$$

en el que  $k_2$  es el coeficiente del término de segundo grado,  $k_1$  el coeficiente del término de primer grado,  $k_0$  el término independiente, t el tiempo y S la concentración de sustrato en cada instante.

Posteriormente, Romero<sup>9</sup> y Nebot<sup>10</sup>, al aplicar este modelo a la depuración biológica anaerobia de vinazas de vino consideran que la reacción entre el sustrato y microorganismos viene dada por la ecuación:



donde S es la concentración de sustrato, que se puede relacionar con la DQO (mg/l) y X es la concentración de microorganismos presentes en el medio.

Considerando la velocidad como función de la concentración de los reactivos se tiene:

$$-\frac{dS}{dt} = k \cdot S \cdot X \quad (2)$$

Como todo el sustrato no llega a degradarse, la concentración de sustrato total ( $S_T$ ) sería igual al sustrato degradado ( $S_d$ ) más el sustrato no degradado ( $S_{nd}$ )

$$S_T = S_d + S_{nd} \quad (3)$$

Tras considerar la aproximación

$$-\frac{dS}{dt} = k \cdot \frac{dX}{dt}$$

y operando con las expresiones (1), (2) y (3), se obtiene la siguiente expresión:

$$-\frac{dS}{dt} = -\frac{k'}{k} S_T^2 + \left[ k' X_{max} + \frac{k'}{k} S_{nd} \right] S_T - k' S_{nd} X_{max} \quad (4)$$

donde:

$$k_2 = -\frac{k'}{k}$$

$$k_1 = k' X_{max} + \left( \frac{k'}{k} \right) S_{nd}$$

$$k_0 = -k' S_{nd} \cdot X_{max}$$

siendo  $k'$  una constante, y  $X_{max}$  es la concentración máxima de microorganismos alcanzable en el medio, en el caso de que toda la materia orgánica se consumiese.

Integrando la ecuación de Quiroga y Sales, entre las condiciones iniciales ( $S_i = S_0$  y  $t_i = 0$ ) y finales ( $S_f = S$  y  $t_f = t$ ), se obtiene lo siguiente:

$$S = \frac{(S_0 - q)h - (S_0 - h)q \cdot e^{pt}}{(S_0 - q) - (S_0 - h)e^{pt}} \quad (5)$$

en la que:

$$p = k' \left( X_{max} - \frac{S_{nd}}{k} \right)$$

$$h = k \cdot X_{max}$$

$$q = S_{nd}$$

adscribiendo los autores citados los significados siguientes a los parámetros: p tiene significación de velocidad máxima; h representa la cantidad máxima de sustrato disponible en el medio para formar biomasa; q representa la concentración de sustrato no metabolizada por los microorganismos.

El modelo simplificado de degradación de sustrato parte de considerar que el coeficiente  $k_2$  de la ecuación (1) se hace despreciable, según lo cual, la ecuación representativa del proceso correspondería a una cinética de orden variable entre cero y uno.

nética de orden variable entre cero y uno.

$$V = -\frac{dS}{dt} = k_1 \cdot S + k_0 \quad (6)$$

Esta ecuación supone que la velocidad de consumo de sustrato se anula únicamente cuando  $k_1 \cdot S = -k_0$ , o sea, cuando el valor de la concen-

tración de la materia orgánica presente en el medio es igual a  $(-k_0/k_1)$ . Dicho valor representa, por tanto, el nivel de materia orgánica difícilmente biodegradable o no utilizable por los microorganismos.

Integrando entre las condiciones iniciales ( $S_i = S_0$  y  $t_i = 0$ ) y finales ( $S_f = S$  y  $t_f = t$ ), se obtiene el modelo simplificado de degradación de sustrato:

$$S = -\frac{k_0}{k_1} + \left( S_0 + \frac{k_0}{k_1} \right) \cdot e^{-k_1 t} \quad (7)$$

La expresión resultante para la concentración de producto generado, suponiendo que el coeficiente de rendimiento  $Y_{p/s}$  se mantiene constante en el proceso y para procesos en discontinuo, es la siguiente:

$$\frac{dP}{dt} = Y_{p/s} \left( -\frac{dS}{dt} \right)$$

Integrando se obtiene la ecuación respecto del producto:

$$P = P_0 + Y_{p/s} (S_0 - S)$$

donde al sustituir S por su ecuación integrada, en función del tiempo (7) queda:

## 2. TRATAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN

Se han estudiado dos modelos cinéticos:

### 2.1. Modelo de Roediger

A continuación se presenta la ecuación de Roediger:

$$G = G_m (1 - e^{-k_1 t})$$

donde,

G: volumen de metano acumulado (ml) a tiempo t

$G_m$ : volumen de metano acumulado a tiempo infinito (ml)

## ARTICULOS TECNICOS

**Tabla I**

Parámetros del modelo de Roediger, y volumen de metano acumulado experimental (G) respecto a la carga añadida. Reactor sin soporte, Testigo.

carga (gDQO/l)	TESTIGO			
	G (ml)	G <sub>m</sub> (ml)	k (día <sup>-1</sup> )	r
0,6	122	127,6	0,328	0,9928
1,2	345	353,5	0,349	0,9957
1,8	431	437,1	0,263	0,9973
2,4	451	453,0	0,324	0,9938
3,0	730	741,7	0,253	0,9996
3,5	883	922,7	0,244	0,9996
4,5	979	976,3	0,292	0,9988
5,0	1183	1201,6	0,265	0,9996
6,0	1211	1217,8	0,319	0,9989
7,0	1380	1348,1	0,275	0,9973

k: constante específica de velocidad (día<sup>-1</sup>)

Aplicados los datos de volumen de metano acumulado experimental (Parte I del presente artículo) al modelo, se obtienen valores de k y G<sub>m</sub> para cada carga, así como el coeficiente de correlación del ajuste lineal, en un límite de confianza del 95% (Tablas I a V).

En la **Figura 1** se representan las constantes específicas de velocidad, k (día<sup>-1</sup>), para cada carga y reactor. Puede observarse cómo a partir de 3,0 g/l todos los reactores se estabilizan, respecto a las bajas cargas, destacando el soporte Zeolita y el Testigo con los valores más bajos, si bien las diferencias con los demás soportes son pequeñas. En general,

la progresión de las curvas es descendente a mayor carga. El reactor con soporte Esmectita presenta los valores más altos a bajas cargas.

El parámetro G<sub>m</sub> de la ecuación de Roediger está relacionado con la DQO<sub>C</sub> tras cada carga (Tabla XI) según la expresión:

$$G_m = Y_{P/S} \cdot DQO_C$$

por lo tanto se puede expresar:

$$G_m = Y_{P/S} (DQO_{inicial} - DQO_{efluente}) \quad (1)$$

DQO<sub>inicial</sub>: DQO existente en el reactor al comienzo de cada prueba igual a la DQO residual más la carga añadida.

DQO<sub>efluente</sub>: DQO del efluente al final de la prueba.

Sustituyendo la ecuación (1) en la expresión de Roediger se tiene:

$$G = Y_{P/S} (DQO_{inicial} - DQO_{efluente}) [1 - e^{-k \cdot t}] \quad (2)$$

Se busca un modelo matemático en la bibliografía, que responda a esta expresión (2), encontrándose el modelo de Quiroga-Sales.

**Tablas II y III**

Parámetros del modelo de Roediger, y volumen de metano acumulado experimental respecto a la carga añadida. Reactores con soporte Saponita y Zeolita.

carga (gDQO/l)	SAPONITA				ZEOLITA			
	G (ml)	G <sub>m</sub> (ml)	k (día <sup>-1</sup> )	r	G (ml)	G <sub>m</sub> (ml)	k (día <sup>-1</sup> )	r
0,6	75	72,2	0,590	0,9702	190	255,6	0,174	0,9977
1,2	262	259,1	0,492	0,9906	430	452,4	0,298	0,9994
1,8	300	289,3	0,449	0,9928	384	368,8	0,499	0,9938
2,4	326	313,4	0,437	0,9858	344	330,3	0,444	0,9888
3,0	739	735,1	0,313	0,9992	745	768,7	0,251	0,9996
3,5	853	842,2	0,342	0,9987	908	964,3	0,262	0,9987
4,5	974	946,8	0,334	0,9977	1075	1067,3	0,293	0,9992
5,0	1266	1257,6	0,293	0,9992	1278	1287,2	0,249	0,9997
6,0	1185	1175,1	0,355	0,9983	1284	1285,9	0,305	0,9988
7,0	1480	1445,2	0,292	0,9973	1507	1529,5	0,218	0,9970

Tablas IV y V

Parámetros del modelo de Roediger, y volumen de metano acumulado experimental respecto a la carga añadida. Reactores con soporte Sepiolita calcinada y Esmeclita aluminica.

carga (gDQO/l)	EPIOLITA TRATADA				ESMECTITA ALUMINICA			
	G (ml)	Gm (ml)	k (día-1)	r	G (ml)	Gm (ml)	k (día-1)	r
0,6	134	144,5	0,342	0,9994	97	97,0	0,591	0,9943
1,2	362	365,0	0,425	0,9987	313	321,7	0,418	0,9977
1,8	372	355,5	0,516	0,9933	337	328,4	0,648	0,9980
2,4	367	355,4	0,438	0,9902	362	352,7	0,621	0,9953
3,0	703	695,0	0,278	0,9956	669	659,7	0,346	0,9969
3,5	839	859,6	0,363	0,9989	831	821,5	0,336	0,9987
4,5	1063	1037,3	0,326	0,9982	909	875,0	0,393	0,9964
5,0	1280	1264,8	0,287	0,9989	1185	1174,0	0,291	0,9992
6,0	1255	1247,0	0,325	0,9985	1088	1072,0	0,354	0,9978
7,0	1639	1606,4	0,227	0,9969	1584	1534,0	0,240	0,9954

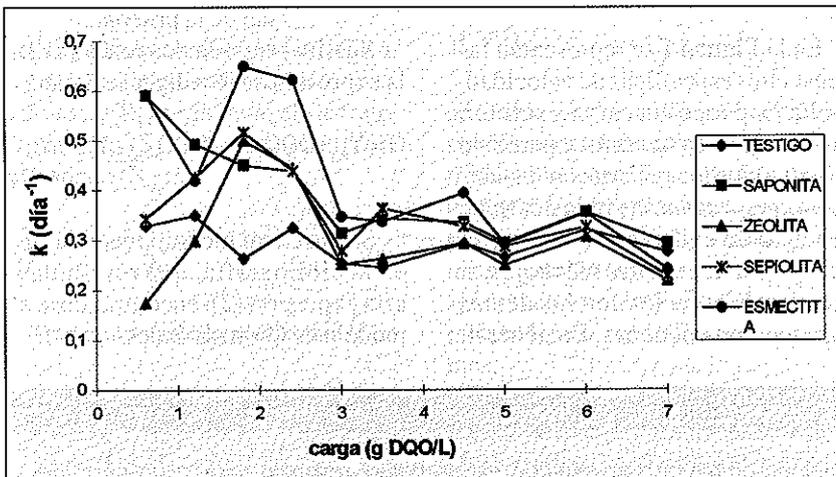


Figura 1.- Valores de k (días-1) frente a la carga, para cada reactor.

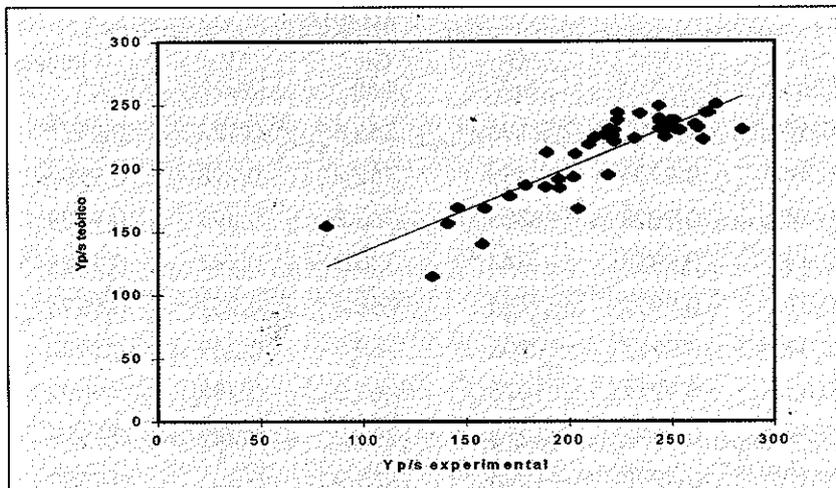


Figura 2.- Recta de regresión correspondiente a los valores teóricos frente a los experimentales del coeficiente de rendimiento de producción de metano, YP/S.

## 2.2. Modelo Quiroga-Sales

El modelo se basa en los parámetros que se han medido en este trabajo y encuentra una relación entre la producción de metano y la DQO<sub>C</sub> durante la experiencia. Proporciona, además, datos estimados del coeficiente de rendimiento en producción de metano. La ecuación correspondiente, respecto a la formación de producto, aplicada en este caso en su forma simplificada es:

$$G = G_0 + Y_{p/s} \left[ S_t + \frac{k_0}{k_1} \right] \left[ 1 - e^{-k_1 t} \right]$$

G<sub>0</sub>: volumen de metano inicial (ml), que en este caso es cero

Y<sub>p/s</sub>: coeficiente de rendimiento de producción de metano (ml CH<sub>4</sub> / g DQO<sub>C</sub>)

S<sub>T</sub>: DQO al inicio de la prueba (g/l)

k<sub>0</sub>: constante (g/l d<sup>-1</sup>)

k<sub>1</sub>: constante cinética (d<sup>-1</sup>)

(S<sub>T</sub> + k<sub>0</sub> / k<sub>1</sub>): sustrato biodegradado (g/l)

Se introducen en esta nueva ecuación los valores de metano frente al tiempo, para cada carga, y se calculan los parámetros k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> e Y<sub>p/s</sub> (Ta-

Tabla VI

Parámetros del modelo de Quiroga y Sales respecto a la carga añadida. Reactor sin soporte, TESTIGO.

carga (gDQO/l)	St (g/l)	G (ml)	$Y_{p/s}$ estim. (ml/g)	$k_0$ (g/d <sup>-1</sup> )	$k_1$ (d <sup>-1</sup> )	(St+k <sub>0</sub> /k <sub>1</sub> ) (g/l)	r
0,6	2,29	118,4	154,4	-0,481	0,328	0,82	0,9928
1,2	1,95	345,9	222,1	-0,125	0,349	1,59	0,9957
1,8	2,82	422,9	221,4	-0,222	0,263	1,97	0,9973
2,4	3,78	443,6	192,9	-0,464	0,324	2,35	0,9938
3,0	4,32	725,1	230,2	-0,278	0,253	3,23	0,9996
3,5	4,96	884,2	237,9	-0,264	0,244	3,88	0,9996
4,5	5,63	969,5	223,6	-0,373	0,292	4,36	0,9986
5,0	6,08	1184,3	237,5	-0,272	0,266	5,06	0,9996
6,0	6,95	1204,0	220,9	-0,460	0,319	5,51	0,9989
7,0	8,00	1343,0	224,1	-0,545	0,275	6,01	0,9973

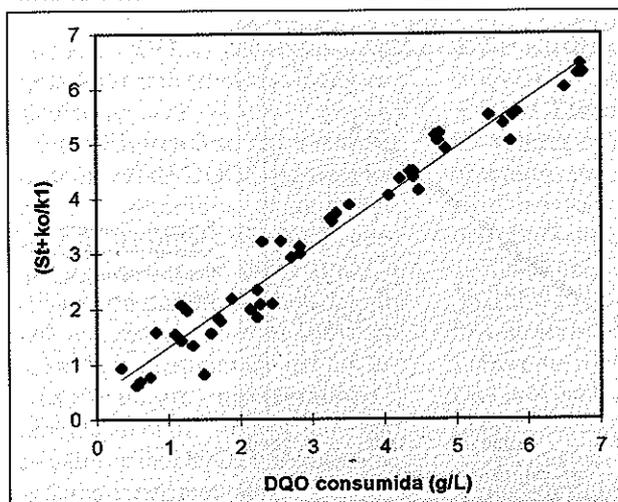


Figura 3.- Ajuste lineal de DQO<sub>c</sub> frente al término (St+k<sub>0</sub>/k<sub>1</sub>).

*Encuentra una  
relación entre  
la producción  
de metano  
y la DQO<sub>c</sub>*

Tabla VII

Parámetros del modelo de Quiroga y Sales respecto a la carga añadida. Reactor con soporte SAPONITA.

carga (gDQO/l)	St (g/l)	G (ml)	$Y_{p/s}$ estim. (ml/g)	$k_0$ (g/d <sup>-1</sup> )	$k_1$ (d <sup>-1</sup> )	(St+k <sub>0</sub> /k <sub>1</sub> ) (g/l)	r
0,6	1,19	71,5	115,0	-0,332	0,590	0,56	0,9702
1,2	1,79	257,9	191,7	-0,215	0,492	1,34	0,9906
1,8	2,21	288,5	185,3	-0,292	0,449	1,59	0,9928
2,4	2,94	311,7	169,3	-0,480	0,437	2,23	0,9858
3,0	3,60	728,4	234,3	-0,148	0,313	2,82	0,9992
3,5	4,14	832,3	231,8	-0,177	0,342	3,25	0,9987
4,5	5,20	943,6	225,8	-0,276	0,334	4,40	0,9977
5,0	5,60	1246,0	243,5	-0,130	0,293	4,75	0,9992
6,0	6,61	1167,0	218,8	-0,441	0,355	5,65	0,9983
7,0	7,64	1442,0	230,0	-0,396	0,292	6,68	0,9973

Tabla VII

Parámetros del modelo de Quiroga y Sales respecto a la carga añadida. Reactor con soporte ZEOLITA.

carga (gDQO/l)	St (g/l)	G (ml)	$Y_{P/S}$ estim. (ml/g)	$k_0$ (g/l d <sup>-1</sup> )	$k_1$ (d <sup>-1</sup> )	(St+k <sub>0</sub> /k <sub>1</sub> ) (g/l)	r'
0,6	2,05	195,0	270,3	-0,194	0,174	0,35	0,9977
1,2	2,80	435,3	218,2	-0,216	0,298	1,18	0,9994
1,8	3,28	366,4	168,2	-0,542	0,499	1,88	0,9938
2,4	3,64	328,6	156,6	-0,681	0,444	2,44	0,9888
3,0	4,02	750,7	238,2	-0,201	0,251	2,30	0,9996
3,5	4,93	932,3	237,9	-0,230	0,262	4,06	0,9987
4,5	5,18	1060,0	236,9	-0,198	0,293	4,40	0,9992
5,0	5,59	1263,2	250,1	-0,110	0,249	4,70	0,9997
6,0	6,63	1267,9	230,8	-0,323	0,305	5,84	0,9988
7,0	7,52	1513,8	243,6	-0,271	0,218	6,73	0,9970

blas VI a X), además del valor del coeficiente de correlación (r') del ajuste de este modelo a los valores obtenidos experimentalmente.

Si se representa el coeficiente de rendimiento de producción de metano,  $Y_{P/S}$ , teórico o estimado (obtenido de la ecuación de Quiroga y Sales) frente al  $Y_{P/S}$  experimental, se observa un ajuste lineal con un coeficiente de correlación, r, igual a 0,9522 (Figura 2).

Empleando los valores de DQO residual (DQO<sub>r</sub>) de cada carga, se

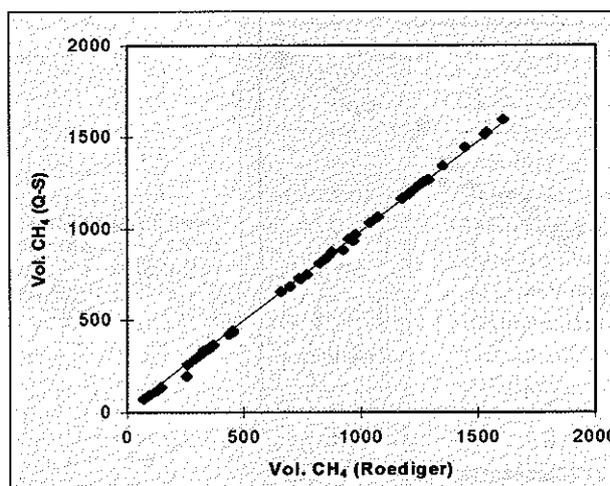


Figura 4.- Contraste del volumen de metano teórico (ml) de ambos modelos.

Tabla IX

Parámetros del modelo de Quiroga y Sales respecto a la carga añadida. Reactor con soporte SEPIOLITA CALCINADA.

carga (gDQO/l)	St (g/l)	G (ml)	$Y_{P/S}$ estim. (ml/g)	$k_0$ (g/l d <sup>-1</sup> )	$k_1$ (d <sup>-1</sup> )	(St+k <sub>0</sub> /k <sub>1</sub> ) (g/l)	r'
0,6	1,28	135,2	187,0	-0,174	0,342	0,75	0,9994
1,2	1,69	362,7	234,8	-0,062	0,425	1,09	0,9987
1,8	2,34	353,5	194,8	-0,266	0,516	1,69	0,9933
2,4	2,97	353,5	178,5	-0,429	0,438	2,14	0,9902
3,0	3,71	684,3	231,4	-0,196	0,278	2,83	0,9956
3,5	4,23	852,0	230,7	-0,183	0,363	3,33	0,9989
4,5	5,20	1033,2	231,2	-0,232	0,326	4,35	0,9982
5,0	5,64	1252,1	243,9	-0,131	0,287	4,77	0,9989
6,0	6,62	1234,1	226,4	-0,361	0,325	5,78	0,9985
7,0	7,56	1592,9	248,7	-0,250	0,227	6,72	0,9969

TABLA X

Parámetros del modelo de Quiroga y Sales respecto a la carga añadida. Reactor con soporte ESMECTITA ALUMÍNICA

carga (gDQO/l)	S <sub>t</sub> (g/l)	G (ml)	Y <sub>p/s</sub> estim. (ml/g)	k <sub>s</sub> (g/l d <sup>-1</sup> )	k <sub>1</sub> (d <sup>-1</sup> )	(S <sub>t</sub> +k <sub>0</sub> /k <sub>1</sub> ) (g/l)	r
0,6	1,13	96,1	140,2	-0,259	0,591	0,61	0,9943
1,2	1,69	319,6	222,5	-0,102	0,418	1,18	0,9977
1,8	2,26	337,2	184,8	-0,313	0,648	1,72	0,9980
2,4	2,87	352,6	168,9	-0,486	0,621	2,27	0,9953
3,0	3,51	656,0	224,7	-0,199	0,346	2,71	0,9969
3,5	4,16	811,1	229,8	-0,197	0,336	3,27	0,9987
4,5	5,19	873,9	211,3	-0,415	0,393	4,47	0,9964
5,0	5,54	1162,9	239,2	-0,184	0,291	4,85	0,9992
6,0	6,49	1064,5	212,6	-0,513	0,354	5,75	0,9978
7,0	7,49	1524,1	243,3	-0,285	0,240	6,75	0,9954

obtiene la DQO<sub>c</sub> en cada caso. En la **Tabla XI** se muestran los valores así calculados.

En la **Figura 3** se representa el ajuste lineal de DQOC frente a los valores obtenidos calculando (S<sub>t</sub>+k<sub>0</sub>/k<sub>1</sub>) (**Tablas VI a X**). El coeficiente de regresión es igual a 0,9813 con pendiente de 0,90, lo cual confirma que el término (S<sub>t</sub>+k<sub>0</sub>/k<sub>1</sub>), denominado por los autores "sustrato biodegradado", coincide en el presente estudio con los valores de DQO<sub>c</sub> obtenidos de los datos experimentales.

### 2.3. Comparación de ambos modelos

En la **Figura 4**, se representan los valores de metano teóricos (ml) obtenidos por ambos modelos matemáticos, cuya ecuación lineal correspondiente es:  $y = -5,76 + 0,99x$ . con un coeficiente de correlación de 0,9997. Queda patente que ambos modelos matemáticos sirven para representar perfectamente, a este proceso de depuración anaerobia.

Así mismo, los valores obtenidos de las constantes específicas de ve-

locidad de ambos modelos matemáticos, son iguales en más del 99% de los casos, como también lo son los coeficientes de correlación del ajuste de los datos experimentales, r y r' (**Tablas VI a X**).

### 3. CONCLUSIÓN

La producción de metano acumulado se ajusta por igual a dos modelos matemáticos que presentan las siguientes ecuaciones:

TABLA XI  
Valores calculados de DQO consumida en cada carga.

carga (gDQO/l)	TESTIGO	SAPONITA	ZEOLITA	SEPIOLITA CALCINADA	ESMECTITA ALUMÍNICA
0,6	1,49	0,56	0,35	0,75	0,61
1,2	0,83	1,34	1,18	1,09	1,18
1,8	1,26	1,59	1,88	1,69	1,72
2,4	2,23	2,23	2,44	2,14	2,27
3,0	2,56	2,82	2,30	2,83	2,71
3,5	3,51	3,24	4,06	3,33	3,27
4,5	4,22	4,40	4,40	4,35	4,48
5,0	4,74	4,74	4,70	4,77	4,85
6,0	5,45	5,65	5,84	5,78	5,75
7,0	6,50	6,68	6,74	6,72	6,75

a)

$$G = G_m (1 - e^{-k_1 t})$$

b)

$$P = P_0 + Y_{p/s} \left[ S_t + \frac{k_0}{k_1} \right] \left[ 1 - e^{-k_1 t} \right]$$

siendo el modelo b) el que permite obtener una mayor información de los parámetros del proceso.

Las constantes cinéticas en ambos modelos (con unidades de velocidad específica) se correlacionan con la producción máxima de metano, obtenida en las primeras 48 horas.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

1. McCarty, P.L. ( Mosey, F. E.. "Modelling of anaerobic digestion processes.: A discussion of concepts". Wat. Sci. Tech. 24 (8):17-33 (1991).
2. Monod, J.. "La technique de cultur continue, theorie et applications". Anu. Inst. Pasteur (Lille) 78:390 (1950).
3. Contois, D.E.. "Kinetic of bacterial growth, relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures". J. Gen. Microbiol., 21:40-45 (1959).
4. Winkler, M.. Tratamiento biológico de las aguas de desecho. Ed. Limusa . México (1986).
5. Gujer, W. ( Zehnder, A.J.. "Conversion processes in anaerobic digestion". Water Sci. Technol. 15, 123-167 (1983).
6. Jeris, J.. "Industrial wastewater treatment using anaerobic fluidized bed reactors". Wat. Sci. Technol. 15:169-176 (1983).
7. Tong, X., Smith, L.H. ( McCarty, L.. "Methane fermentation of selected lignocellulosic materials". Biomass. 21:239-255 (1989).
8. Quiroga, J.M. ( Sales, D.. "Degradation kinetics of surfactants". Tenside Surf. Det. 28(1):27-30 (1991).
9. Romero García, L.I.. "Desarrollo de un modelo matemático general para los procesos fermentativos; cinética de la degradación anaerobia". Tesis Doctoral. Univ. Cádiz (1991).
10. Nebot Sanz, E.. "Caracterización de los principales parámetros de operación de sistemas tipo filtro anaerobio: aplicación al diseño". Tesis Doctoral. Univ. Cádiz (1992).
11. M. Durán Barrantes, P. Álvarez Mateos, F. Romero Guzmán. Depuración anaerobia de purines de cerdo a 25 °C: Influencia del soporte de inmovilización. I Estudio Cinético. Tecnología del Agua n° 165 pág. 49-57. (1997).

### RECOMENDACIONES A LOS AUTORES DE ARTICULOS

La revista TECNOLOGIA DEL AGUA tiene como objetivo esencial la divulgación e intercomunicación entre todas aquellas personas y entidades vinculadas al mundo del agua y, por lo tanto, en la presentación de los trabajos es necesario tener en cuenta tanto a nivel formal como de contenido, un conjunto de exigencias habituales en el periodismo tecnico-científico. Por ello, seguidamente relacionamos algunas normas, con el fin de facilitar la publicación de los artículos.

- 1) El título con el correspondiente subtítulo no deben sobrepasar en total los 100 espacios.
- 2) Deberá figurar el nombre y dos apellidos del autor o autores, su titulación y/o a cargo en el organismo o empresa a que pertenezcan, dirección completa y teléfono de contacto.
- 3) Al principio del artículo se incluirá un breve resumen del mismo, de no más de 100 palabras que además se publicará junto con el título en lengua inglesa.
- 4) El texto seguirá una línea de explicación coherente y progresiva, constando de partes con subtítulos numerados, que habitualmente empiezan con una introducción del tema, para pasar a su estudio pormenorizado, terminando con las conclusiones a modo de resultado de dicho estudio. Finalmente se relacionará la bibliografía o bien aquellos textos cuya lectura se recomienda.

- 5) El artículo se se redactará eludiendo el lenguaje académico o excesivamente denso, sin por ello dejar de mantener un rigor conceptual, explicando cuando convenga aquellos términos o conceptos de uso poco habitual.
- 6) Preferentemente se utilizarán frases y párrafos cortos, también se evitarán en lo posible la inclusión de notas a pie de página, incorporándolas dentro del texto.
- 7) Se cuidará la correcta expresión de las unidades, símbolos y abreviaciones.
- 8) El texto tendrá una extensión total de unas 5-15 hojas, formato DIN A4 mecanografiado a doble espacio.
- 9) Preferentemente se incluirán gráficos, esquemas, dibujos o fotografías para facilitar la comprensión del texto, procurando tengan suficiente calidad gráfica para su reproducción directa. Cada figura llevará su número y pie explicativo.
- 10) El artículo debe remitirse sobre papel, y también en disquete 5 1/4 ó 3 1/2 escrito en Word, Wordperfect, o compatibles... debiéndose dirigir al Dtor. Técnico de la revista TECNOLOGIA DEL AGUA, a la dirección siguiente:

ELSEVIER PRENSA, S.A.  
Avda. Paral. lel 180  
08015 BARCELONA