

## **Predicción de la calidad del lixiviado producido en rellenos sanitarios**

*Rubén Alberto Agudelo García\**, *Francisco Fernando García Rentería\*\** y *Carolina Meza Rivera\*\*\**

(Recibido el 14 de febrero de 2002)

### **Resumen**

Este artículo presenta un modelo matemático desarrollado con el propósito de predecir la concentración de los contaminantes presentes en el lixiviado producido por la biodegradación de los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario. El modelo consiste en una ecuación cinética de primer orden, capaz de describir los procesos de degradación de la materia orgánica presente en los residuos sólidos. Este fue calibrado usando los resultados obtenidos a escala laboratorio mediante la utilización de seis lixímetros operados bajo diferentes condiciones. El modelo predijo la concentración de los contaminantes en el lixiviado con una exactitud del 94%.

----- *Palabras clave:* relleno sanitario, lixiviado, lixímetros, residuos sólidos municipales, recirculación, biodegradable, modelo matemático.

## **Quality prediction of a leachate produced in a sanitary landfill**

### **Abstract**

This paper presents a mathematical model developed to predict the concentration of pollutants in the leachate produced by biological decomposition of solid wastes disposed in sanitary landfills. The model consists in a kinetic equation of first level, able for describe the degradation of the organic matter being the solid wastes. This model was calibrated using results obtained from six laboratory scale lysimeters operated under different conditions.

----- *Key words:* sanitary landfill, leachate, lysimeters, municipal solid waste, recirculation, biodegradable. mathematical model.

---

\* Profesor Ingeniería Sanitaria. Universidad de Antioquia. ragudelo@udea.edu.co.

\*\* Ingeniero Sanitario. Candidato Maestría en Ingeniería Ambiental. effgr337@udea.edu.co.

\*\*\* Estudiante Ingeniería Sanitaria Universidad de Antioquia. ecamr710@udea.edu.co.

## Introducción

La disposición final en rellenos sanitarios (RS), pese a haber perdido importancia en el manejo de los residuos sólidos por la instauración de otras acciones y tecnologías como el reciclaje, incineración y compostaje entre otras, aún es el principal método de disposición de residuos municipales y de muchos residuos peligrosos en el mundo. Los lixiviados (los cuales son liberados de los residuos y pasan a fase líquida mediante procesos físicos, químicos y biológicos complejos) de RS son reconocidos como el principal impacto negativo asociado con esta técnica de disposición de residuos sólidos, dados los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en ellos.

La estimación del volumen del lixiviado y la concentración de los contaminantes presentes en él, es un aspecto de importancia en la operación de los RS. El conocimiento de ellos brinda la oportunidad de incorporar medidas para la recolección y tratamiento de estos líquidos, altamente contaminantes, y prevenir los impactos que generan sobre la calidad del agua, superficial y subterránea, y el suelo. Igualmente proporciona una estimación de la duración de los procesos de descomposición de los residuos sólidos hasta la degradación total de los materiales dispuestos y el fin de los procesos biológicos, físicos y químicos más importantes que se dan allí.

La presencia de contaminantes en el lixiviado depende de muchos factores como la composición inicial de los residuos, el tamaño de las partículas, el grado de compactación, las condiciones hidrológicas del lugar, el clima y la edad de los residuos dispuestos, entre otros [1]. La composición de los lixiviados que se producirán al disponer los residuos sólidos puede verse afectada también por las prácticas de operación del RS y la recuperación de materiales (plástico, papel, metales y vidrio) lo cual hace que se incremente el porcentaje de materia orgánica dispuesta en comparación con la fracción inorgánica. Igualmente la recirculación de lixiviados, así como la disposición de lodos procedentes de plantas de aguas residuales pueden afectar su calidad.

En esta investigación se predijo la concentración de los contaminantes en el lixiviado, generados por la disposición de los residuos sólidos en diferentes opciones de manejo, incluyendo el caso de la recirculación, mediante la formulación de un modelo matemático desarrollado, calibrado y validado con la utilización de lixímetros a escala de laboratorio.

## Predicción de la calidad de lixiviados

Construir un modelo y predecir la composición y volumen de los lixiviados producidos en un RS de residuos sólidos municipales debe comprender como mínimo las siguientes aproximaciones. La primera y más simple de estas tiene que ver con una ecuación empírica de curva de concentración de contaminantes [1, 2, 3], la cual se presenta, generalmente, como la concentración de los contaminantes versus el tiempo de acumulación de lixiviado de acuerdo con la cantidad de residuos dispuestos. Este modelo debe reflejar la disminución de la calidad de contaminantes en el lixiviado, que van desde alta concentración inicial hasta baja concentración final.

Como segunda aproximación, tenemos que el modelo que se desarrollará debe describir cuantitativamente los procesos biológicos que ocurren durante la producción del lixiviado. El modelo propuesto fue desarrollado originalmente por Straub y Lynch [4]. Estos autores usaron cuatro ecuaciones para describir la solubilización de la materia orgánica, su degradación y el crecimiento de la biomasa anaerobia acidogénica y metanogénica. Se usó una ecuación cinética de primer orden para la tasa de solubilización mientras que el modelo de Monod [5] se usó para las tasas de degradación y la tasa de crecimiento de los microorganismos. Estas experiencias pueden comprobarse mediante la utilización de lixímetros los cuales simulan una serie de reactores completamente mezclados, donde se replican los procesos de degradación de la materia orgánica que ocurren en un RS.

En un segundo estudio, Strub y Lynch [6] usaron la teoría de flujo insaturado a través de medios porosos para describir el flujo a través del lixímetro. La ecuación de flujo se resolvió explícitamente usando algunos parámetros cinéticos calculados previamente; no se encontró una diferencia significativa entre ambos modelos. Esto permite concluir que el reactor de mezcla completa, supuesto, ofrece una buena simplificación para la simulación de los procesos de descomposición en un lixímetro y por tanto son aplicables a la simulación de los procesos que se dan en un RS.

Algunos modelos de flujo insaturado fueron usados por Korfiatis y Demetracopoulos [7] y Demetracopoulos y otros [8], quienes emplearon diferentes combinaciones numéricas para solucionar la ecuación de flujo y representar el análisis de sensibilidad de la evaluación de los parámetros de la ecuación. Estos resultados no fueron verificados con datos experimentales.

El modelo simple desarrollado por Straub y Lynch [4] fue utilizado secuencialmente por Colin [9] para predecir la calidad del lixiviado de los lixímetros en los laboratorios. Usando un análisis de correlación múltiple de los datos experimentales, Gonullu [10] desarrolló dos ecuaciones para predecir la máxima concentración del sustrato en el efluente y el valor del coeficiente cinético de la actividad microbiana.

Del análisis precedente se desprende que, debido a la lenta tasa de descomposición del desecho respecto a la tasa de flujo, el uso de ecuaciones del flujo para predecir el movimiento de contaminantes a través de un lixímetro o en un RS puede describir la situación con suficiente exactitud.

## **Materiales y métodos**

### ***Lixímetros***

Para el desarrollo de la investigación se construyeron seis (6) lixímetros, en polipropileno refor-

zado con fibra de vidrio de 1,5 m de alto y un diámetro interno de 0,30 m. Estos se aislaron de la temperatura ambiental mediante una capa de 3,5 cm de espuma de poliuretano y cubiertos luego con una capa de plástico para impermeabilizarlos. Los lixímetros fueron dotados con un filtro de 10 cm, en el fondo constituido por grava, separado de la masa de residuos por un geotextil y un plato perforado. La función de este dispositivo es la de retener los residuos y las partículas pequeñas arrastradas por el lixiviado.

### ***Residuos***

Los residuos que se usaron en el experimento fueron tomados del Relleno Sanitario Curva de Rodas (RSCR) el cual recibe los residuos sólidos de Medellín y otros municipios del área metropolitana y el Oriente cercano, con una población servida de unos 3.500.000 habitantes. Para controlar los resultados de la experimentación se efectuó una caracterización dirigida a determinar la composición de los residuos con los cuales se cargaron los lixímetros.

### ***Metodología de llenado***

En el proceso de llenado de los lixímetros se observó particular atención para conservar la composición correcta de los residuos. Las piezas grandes de metal y plástico fueron removidas de los desechos y reemplazadas con un peso equivalente e igual del mismo material triturado previamente. Los residuos puestos en cada lixímetro fueron compactados a una tasa de 1:3, para obtener una densidad entre 400 y 600 kg/m<sup>3</sup>, y cubiertos con una capa final de 10 cm de tierra. La simulación de la lluvia, correspondiente a una precipitación media mensual de 2.500 mm/año, se agregó por la parte superior del lixímetro a una tasa constante. Los seis (6) lixímetros usados en la experimentación fueron llenados como se muestra en la tabla 1.

La mezcla de residuos frescos y lodos residuales se realizó en una proporción de dos a uno. Los lodos utilizados en la experimentación procedían

**Tabla 1** Tipo de residuos para utilizar durante la experimentación

<i>Lixímetro No.</i>	<i>Contenido</i>	<i>Peso total (kg)</i>	<i>Peso seco (kg)</i>	<i>Humedad inicial (kg)</i>	<i>Humedad (% del peso total)</i>	<i>Densidad de compact.</i>	<i>Capacidad de campo (% del peso total)</i>
1	Residuos frescos	39,04	10,95	28,09	71,95	465,25	56,3
2	Residuos triturados	45,19	12,68	32,51	71,95	538,55	
3	Residuos frescos con recirculación	57,40	16,10	41,30	71,9	564,89	52,1
4	Residuos triturados con recirculación	45,92	12,88	33,04	71,95	547,25	39,9
5	Residuos frescos y residuos en descomposición	37,57	10,54	27,03	71,95	447,74	54,1
6	Residuos frescos y lodos	42,29	11,86	30,42	71,95	503,93	

de la planta de tratamiento de aguas residuales de El Retiro (Antioquia). La recirculación de los lixiviados se llevó a cabo en los lixímetros dos y seis. Este proceso consistió en devolver a la parte superior del lixímetro el lixiviado colectado durante una semana.

### **Mediciones e indicadores**

El volumen del lixiviado se observó diariamente, se recogió en recipientes de 2,0 l y se guardó a 3-5 °C para su posterior análisis, su caracterización se efectuó a intervalos semanales. En la tabla 2 se presentan los parámetros usados como indicadores en la experimentación, igualmente se indica la frecuencia de medición y los respectivos métodos analíticos usados en las determinaciones de laboratorio.

### **Condiciones de operación**

Los lixímetros fueron puestos en operación el 15 de mayo de 2001 y se instalaron en el RSCR donde se observaron continuamente por un período de cuatro (4) meses (120 días). La recirculación del lixiviado se inició cuando se contó con un volumen suficiente para este pro-

pósito (día nueve). Cada uno de los lixímetros fue irrigado en forma diaria con un caudal de 0,793 l/día.

## **Resultados y discusión**

### **Composición de los residuos**

La composición promedio de los residuos con que se cargaron los lixímetros se muestra en la tabla 3, en esta se puede apreciar que el componente mayoritario es el material putrescible.

### **Modelo matemático**

Para predecir la calidad de los lixiviados hemos partido de la formulación de un modelo matemático basado en una ecuación cinética de primer grado, en la cual se asume que el reactor se comporta como un compartimiento completamente mezclado, con volumen igual a la capacidad de campo de la capa de residuos depositados, donde se destacan dos procesos básicos:

- La solubilización de la materia orgánica y su transferencia de la fase sólida a la fase líquida.

**Tabla 2** Parámetros indicadores de la calidad del lixiviado

<i>Parámetro</i>	<i>Método analítico</i>	<i>Frecuencia</i>
pH	Electrometría	Diario
Demanda química de oxígeno (DQO)	UV-visible (microdigestión)	Semanal
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Electrometría	Quincenal
Ácidos grasos volátiles (AGV)	Titulación potenciométrica	Quincenal
Sólidos disueltos totales (SDT)	Gravimetría	Quincenal
Sólidos suspendidos totales (SST)	Gravimetría	Quincenal
Sólidos volátiles totales (SVT)	Gravimetría	Quincenal
Nitrógeno total Kjendahl (NKT)	Kjendahl	Quincenal
Nitrógeno amoniacal (NH <sub>4</sub> )	Titulométrico	Quincenal
Hierro (Fe), manganeso (Mn), nickel (Ni), zinc (Zn), cromo total (Cr) y cadmio (Cd)	Digestión ácida-lectura en adsorción atómica	Quincenal
Mercurio (Hg)	Adsorción atómica vapor frío	Quincenal

**Tabla 3** Composición de los residuos sólidos usados para llenar los lixímetros

<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Material putrescible	69,50	Huesos	2,60
Papel	12,30	Textil	0,90
Vidrio	1,99	Escombros	0,20
Plástico	10,21	Medicamentos	0,12
Metal	2,17		

- La disminución de la materia orgánica disuelta debido a la descomposición por los microorganismos y el flujo. La concentración de la materia orgánica se representó con la DQO.

El balance de masa alrededor del reactor conocido el flujo, es:

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_e \quad (1)$$

Donde:

$Q_i$  : Caudal de entrada (L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>).

$Q_e$  : Caudal de salida (L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>).

$V$  : Volumen del reactor (L<sup>3</sup>).

Cuando empieza el flujo de lixiviado (cuando sea observado por primera vez), se considerará que los residuos depositados han superado la humedad de su capacidad de campo y el caudal en la entrada deberá ser igual al de la salida. En esta fase se supone que el volumen en el reactor permanece constante. Así:

$$Q_i = Q_e = Q \quad (2)$$

La tasa a la que decrece la materia orgánica en la fase sólida debido a la solubilización  $R_s$  (MT<sup>-1</sup>) se supone que es una cinética de primer orden.

$$R_s = \frac{dM_s}{dt} = -K_1 M_s \quad (3)$$

Donde:

$M_s$  : Masa remanente de lixiviado DQO en la fase sólida (M).

$K_1$  : Tasa constante ( $T^{-1}$ ).

Mediante la integración de (3) se obtiene:

$$M_s = M_{so} e^{-K_1 t} \quad (4)$$

Donde:

$M_{so}$  : Masa inicial de lixiviado (DQO) en la fase sólida (M).

La tasa de transferencia de masa de sólido a líquido  $R_{sl}$  ( $MT^{-1}$ ) está dada por la siguiente ecuación:

$$R_{sl} = -R_s = K_1 M_{so} e^{K_1 t} \quad (5)$$

La masa de DQO en la fase líquida M se supone compuesta por la fracción biodegradable  $M'$  y una fracción no biodegradable  $M''$ .

$$M = M' + M'' \quad (6)$$

La tasa de descomposición biológica de la DQO biodegradable en la fase líquida  $R_{bl}$  se asumirá también como una ecuación cinética de primer orden.

$$R_{bl} = \frac{dM'}{dt} = K_2 M' \quad (7)$$

Donde:

$K_2$  : Constante ( $T^{-1}$ ).

La masa no biodegradable  $M''$  representa el porcentaje fijo  $\lambda$  de la masa total de la DQO M de la fase líquida, se tienen reportes que  $\lambda$  puede suponerse con un valor menor al 5%, para esta investigación se fijó un valor de 2% ( $\lambda = 0,02$ ).

$$M'' = \lambda M \quad (8)$$

Realizando el balance de masa en el reactor se obtiene la siguiente ecuación para la tasa de cambio de la masa no biodegradable  $M''$  y la masa total M en la fase líquida.

$$\frac{dM''}{dt} = \lambda K_1 M_{so} e^{-K_1 t} - \frac{QM''}{V} \quad (9)$$

$$\frac{dM}{dt} = R_{sl} - R_{bl} - \frac{QM}{V} = K_1 M_{so} e^{-K_1 t} - K_2 (M - M'') - \frac{QM}{V} \quad (10)$$

Esta ecuación puede ser redefinida en términos de la concentración en lugar de la masa, como:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_1 M_{so} e^{-K_1 t}}{V} - K_2 (C - C'') - \frac{QM}{V} \quad (11)$$

Donde:

C : Concentración de DQO en el lixiviado ( $ML^{-3}$ ).

$C''$  : Concentración de DQO no biodegradable en el lixiviado ( $ML^{-3}$ ).

Resolviendo esta ecuación se tiene:

$$C(t) = \left[ \frac{K_1 M_{so} e^{-K_1 t}}{(1-\lambda)(K_2 - K_1) * V + q} + \left( \frac{M_{so}}{V} \right) * e^{-\left[ (1-\lambda)K_2 + \frac{q}{V} \right] t} \right] - \frac{K_1 * M_{so} * e^{-\left[ (1-\lambda)K_2 + \frac{q}{V} \right] t}}{V * (1-\lambda)(K_2 - K_1) + q}$$

y para el caso donde se utiliza recirculación se tiene:

$$C(t) = \left[ \frac{M_{so}}{(K_2 - K_1) * V} \right] \left[ (K_1 - K_2 \lambda) * e^{-K_1 t} + (1-\lambda) e^{-K_2 t} + (K_2 - K_1) \lambda \right]$$

Las variables desconocidas en esta ecuación son:  $M_{so}$ ,  $K_1$  y  $K_2$ .

Se procesaron los datos para determinar los parámetros de calibración del modelo para cada uno de los lixímetros, los resultados se muestran en la tabla 4.



**Concentración de contaminantes**

En la tabla 5 se presentan los resultados de las mediciones de DQO en el lixiviado producido, datos que se grafican en la figura 1.

**Aplicación del modelo**

La aplicación de los dos modelos, con recirculación y sin ella se muestra en las figuras 2 y 3,

donde en forma gráfica se comparan los valores que se predicen mediante la utilización del modelo y los valores medidos en la experimentación.

El ajuste de lo predicho a los valores experimentales para las seis simulaciones fue probado estadísticamente por el test no paramétrico de Wilcoxon, el cual compara dos grupos apareados y para probar si la diferencia en las medias de

**Tabla 4** Valores de los parámetros cinéticos obtenidos por el modelo

Lix.	Tipo de residuos	$C_{max}$ (g/l)	$t_{max}$ (día)	$k_1$ (año <sup>-1</sup> )	$k_2$ (año <sup>-1</sup> )	$\gamma$ (%)	$M_{so}$ (kg)	$\lambda$ (%)
1	Residuos frescos	40,27	22	0,072	0,014	6,57	2,564	2
2	Residuos frescos con recirculación	29,60	8	0,047	0,021	5,01	2,266	2
3	Residuos frescos + antiguos	29,60	22	0,060	0,016	5,31	2,497	2
4	Residuos frescos + lodos de PTAR	35,27	15	0,083	0,011	3,97	1,826	2
5	Residuos triturados	53,60	30	0,089	0,013	7,49	2,814	2
6	Residuos triturados con recirculación	40,60	20	0,094	0,013	5,70	2,410	2

**Tabla 5** Variación de la DQO en g/l del lixiviado producido en los lixímetros

Día	Fecha	Lixím. 1	Lixím. 2	Lixím. 3	Lixím. 4	Lixím. 5	Lixím. 6
0	May-15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	May-23	33,600	29,600	25,267	20,933	38,600	33,267
15	May-30	37,933	25,267	29,600	35,267	45,250	40,600
22	Jun-06	40,267	27,412	37,600	30,933	40,930	39,270
30	Jun-14	31,933	18,933	36,600	26,933	53,470	33,270
36	Jun-20	29,933	24,267	32,267	18,267	28,270	28,100
43	Jun-27	27,600	21,600	27,267	20,600	24,270	22,100
50	Jul-04	18,933	17,625	22,600	17,857	18,290	17,240
64	Jul-18	14,814	11,784	21,915	16,267	17,840	15,640
71	Jul-25	14,600	9,878	9,267	13,600	19,000	15,010
78	Ago-01	12,267	7,458	7,600	11,933	13,680	10,230
85	Ago-08	11,267	5,234	4,267	9,933	11,930	9,360
92	Ago-15	8,600	4,236	5,600	6,933	10,210	8,240
99	Ago-22	7,600	3,870	2,933	5,933	7,930	6,120
106	Ago-29	4,600	2,510	1,933	5,600	7,260	5,320
113	Sep-05	3,600	1,784	1,600	3,933	6,270	4,520
120	Sep-12	2,600	1,112	1,600	3,267	5,930	3,780

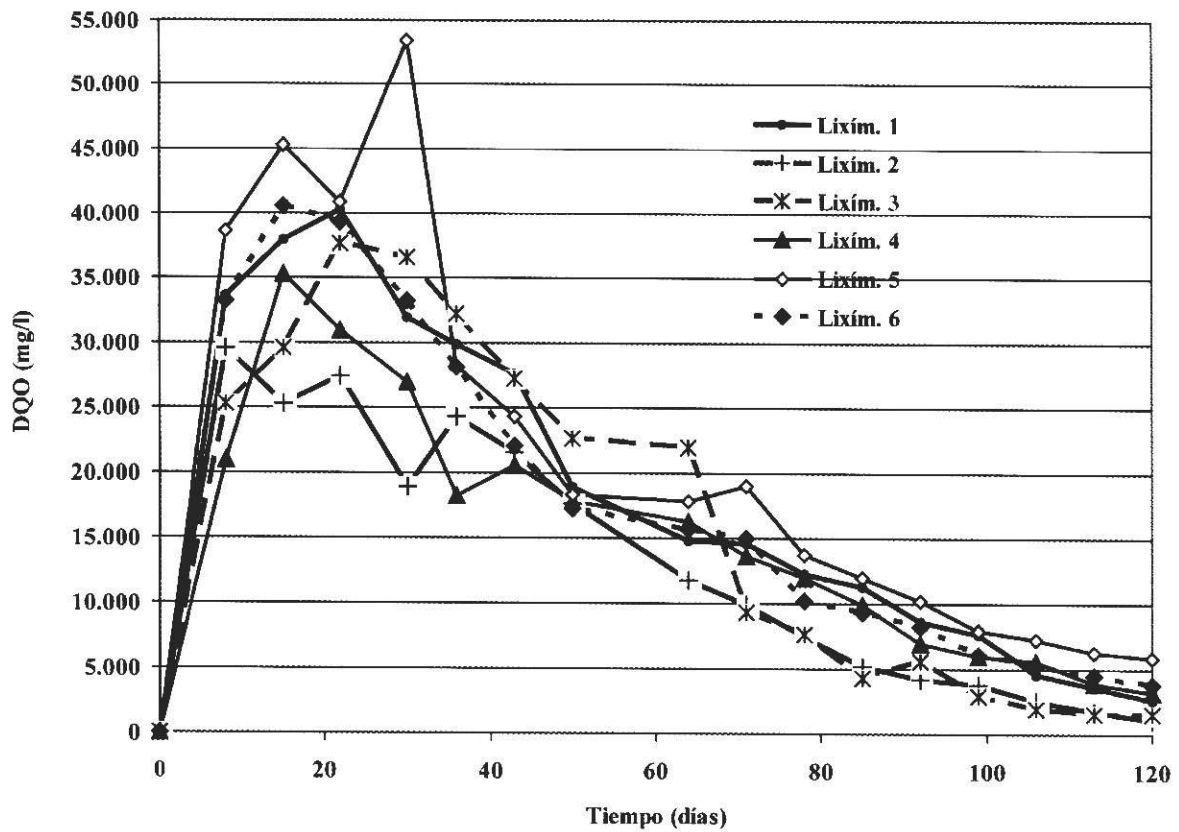


Figura 1 Concentración de la DQO en los lixiviados producidos en los seis lixímetros

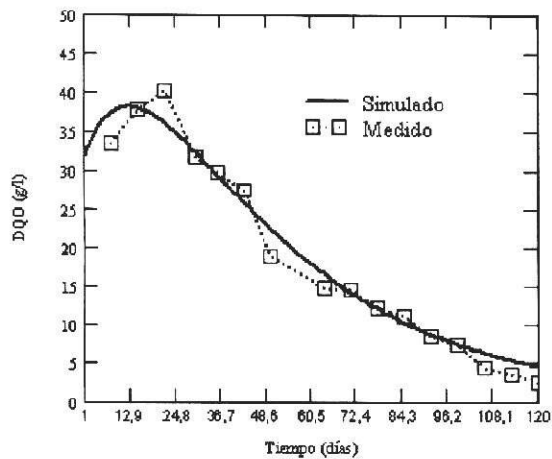


Figura 2 Datos medidos en la experimentación versus simulación efectuada con el modelo de predicción de la calidad del lixiviado, lixímetro 1 (sin recirculación)

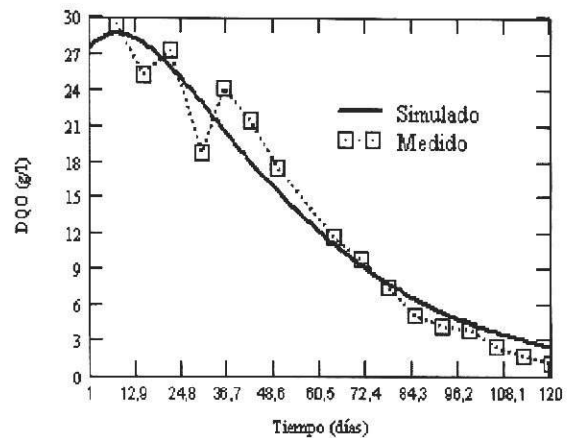


Figura 3 Datos medidos en la experimentación versus simulación efectuada con el modelo de predicción de la calidad del lixiviado, lixímetro 2 (con recirculación)



las dos poblaciones es significativa en un rango de 0 a 5%. También se probó el apareamiento efectivo de los datos al calcular el coeficiente de correlación no paramétrica de Spearman y su importancia estadística. Los resultados se presentan en la tabla 6. Mediante este análisis se puede observar que en las seis simulaciones se obtuvieron unos buenos ajustes de los valores predichos respecto a los valores medidos.

El porcentaje de material lixiviable ( $\lambda$ ) medida como DQO para los lixímetros 1 y 2 fue de 6,57 y 5,01% respectivamente, lo cual indica que del total de residuos cargado en cada lixímetro el 6,57% se producirá como lixiviado para el lixímetro 1 y el 5,01% para el lixímetro 2. El mayor valor de material lixiviable se encontró en el lixímetro 5 con un valor de 7,49% el cual contenía residuos frescos triturados, cuando el mismo tipo de residuos se recirculan con lixivios este valor disminuye hasta 5,70%, lo cual representa una reducción aproximada del 24%. Con lo anterior se confirma que las condiciones de operación cuando se trituran los residuos y cuando no se hace, cambian notablemente la producción de lixivios.

Cuando se trituran los residuos se espera un aumento en el material lixiviable, este aumento

para el caso de esta experimentación fue del 14%. Cuando los residuos triturados fueron sometidos a la recirculación se disminuye la masa de material lixiviable, lo cual confirma la situación de estabilización que sufren los residuos cuando son sometidos a esta condición.

El menor valor de material lixiviable se encontró en el lixímetro 4 donde se combinan residuos frescos y lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de El Retiro, lo cual puede ser un indicio de que este tipo de lodo estabilizado no aporta en forma significativa a la calidad del lixivado en el lixímetro operado bajo esta condición. En general el porcentaje de material lixiviable encontrado en esta investigación difiere muy poco de los resultados reportados en la literatura por otros investigadores. Valores que oscilan entre el 6, 7 y el 11% han sido reportados por Wing [11] y Ehrig [12], respectivamente.

### Análisis de sensibilidad

Se desarrolló un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia relativa de niveles razonables de variabilidad en los cuatro parámetros clave del modelo ( $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $K_1$  y  $K_2$ ) sobre las predicciones. Cada uno de estos parámetros fue variado dentro de límites razonables, mientras los otros tres permanecieron constantes. Los resultados

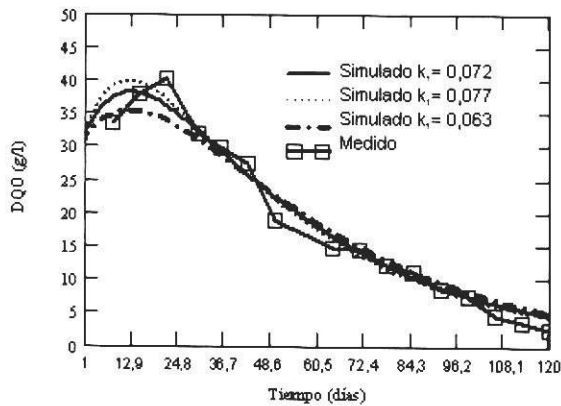
**Tabla 6** Correlación estadística de los valores medidos y predichos

Número de lixímetro	Prueba mediana		Apareamiento		
	Valor de p	Estadísticamente importante hasta 5%	$R_s$ (aproximación de Spearman)	Valor de p	Efectividad del apareamiento
1	0,426	No	0,974	< 0,0001	Sí
2	0,278	No	0,945	< 0,0001	Sí
3	0,238	No	0,925	< 0,0001	Sí
4	0,279	No	0,963	< 0,0001	Sí
5	0,314	No	0,947	< 0,0001	Sí
6	0,318	No	0,948	< 0,0001	Sí

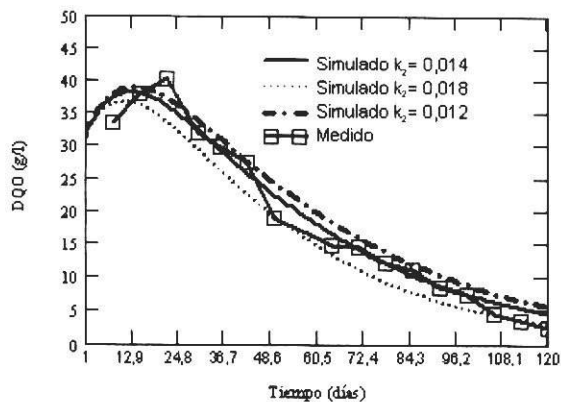
de este análisis para el caso de residuos frescos con recirculación se presentan en las figuras 4, 5, 6 y 7, donde se aprecia el efecto de la variación de estos parámetros en un rango del 20% en exceso y defecto a partir del valor encontrado en la experimentación.

De acuerdo con la figura 4 se concluye que el coeficiente de solubilización  $K_1$  influye sobre la concentración máxima encontrada ( $C_{m\acute{a}x}$ ), al aumentar éste aumenta  $C_{m\acute{a}x}$ , el efecto sobre la variación de este parámetro desaparece hacia los primeros cuarenta (40) días. Por tanto este coeficiente no tiene un efecto marcado sobre el descenso de la curva del tiempo total de estabilización de los desechos.

Según se aprecia en la figura 5 el coeficiente  $K_2$  no influye sobre  $C_{m\acute{a}x}$ , sin embargo posee

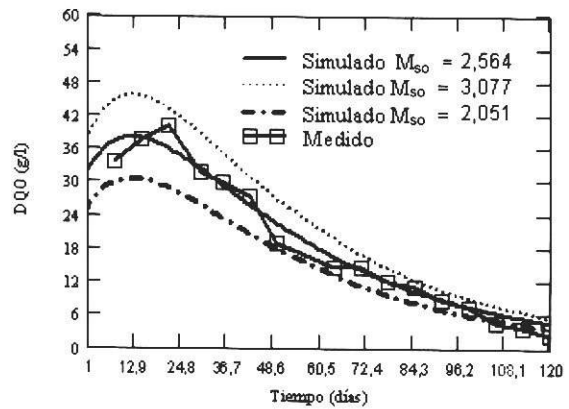


**Figura 4** Sensibilidad del modelo de predicción, variación del coeficiente cinético  $K_1$



**Figura 5** Sensibilidad del modelo de predicción, variación del coeficiente cinético  $K_2$

marcada influencia sobre el descenso de la curva del tiempo total de estabilización de los desechos. En la figura 6 se puede observar que el valor de  $\gamma$  ejerce influencia significativamente importante sobre la concentración máxima de DQO en el lixiviado ( $C_{m\acute{a}x}$ ), es decir al aumentar  $\gamma$  se incrementa  $C_{m\acute{a}x}$ .



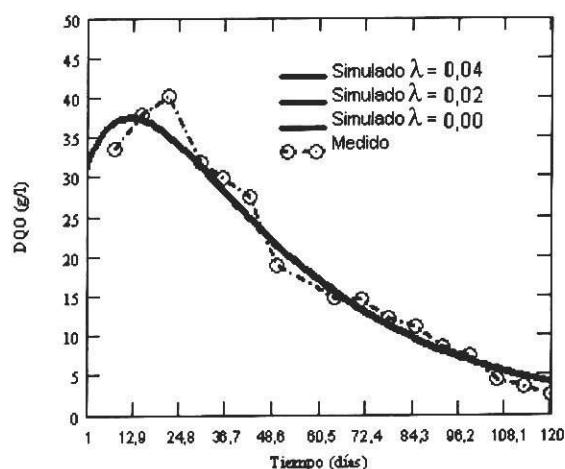
**Figura 6** Sensibilidad del modelo de predicción, variación de la masa lixiviable,  $M_{so}$

En la figura 7 se varió el valor de  $l$  a 0,00 y 0,04 y se le comparó con el valor de 0,02. Las tres gráficas coinciden en su trazo por lo cual se puede establecer que los datos experimentales obtenidos permiten afirmar con certeza que al variar  $l$  de 0 a 0,05 no se presenta ningún efecto sobre la concentración de DQO en el lixiviado, según el modelo de predicción desarrollado. *Esta observación justificaria la eliminación de este parámetro del modelo.*

### Verificación del modelo

Con el fin de efectuar el análisis completo para la verificación del modelo se tomaron los parámetros cinéticos encontrados por otros investigadores [1, 9 13, 14] y se probaron en nuestro modelo. Las características particulares de estos experimentos son presentadas en la tabla 7.

El modelo presenta un intervalo de aproximación de 0,82 según el coeficiente de correlación de Spearman, cuando se comparan los datos simu-



**Figura 7** Sensibilidad del modelo de predicción, variación de la fracción no biodegradable presente en la masa lixiviable,  $\lambda$

**Tabla 7** Parámetros característicos de los experimentos con lixímetros usados para la verificación del modelo

Parámetro	Pohland (1975)	Raveh y Avnimelech (1979)	Colln (1990)	Lee (1991)	Pohland (1980)	Tittlebaum (1982)	Esta investigación	
$\gamma$ (%)	7,50	10,30	12,30	9,00	8,00	8,00	6,57	5,01
$K_1$ (años <sup>-1</sup> )	1,61	1,05	1,98	1,21	3,48	5,11	26,28	17,15
$K_2$ (años <sup>-1</sup> )	1,07	0,92	1,04	0,95	5,40	9,22	5,11	7,65
Recirculación	No	No	No	No	Sí	Sí	No	Sí

lados (resultados de otras investigaciones) con los medidos en la experimentación.

### Conclusiones

El modelo matemático desarrollado basado en una ecuación cinética de primer orden permite predecir la concentración de los contaminantes orgánicos presentes en el lixiviado producido por la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios.

La composición química del lixiviado cambia con la recirculación, mas no con la disposición

conjunta de residuos sólidos y lodo estabilizado de una planta de aguas residuales.

La masa total de material lixiviable para las condiciones de operación de los lixímetros varió entre 3,01 y el 7,49%. Para las condiciones normales bajo las cuales se operan nuestros rellenos sanitarios (sin recirculación, sin mezcla de residuos y lodos y sin triturar los mismos) se encontró un porcentaje del 6,57%.

Triturar los residuos tiene un efecto marcado en la composición de los lixiviados, pues produce un aumento en la concentración de los contaminan-

tes orgánicos e inorgánicos presente en los lixiviados.

### Referencias bibliográficas

1. Raveh, A., and Avnimelech, Y. (1979). "Leachate of pollutants from sanitary landfill models". En: *J. Water Pollution Control Fed.* 51(11). pp. 2.705-2.716.
2. Wing, R. J. (1979). "Boone country field site interim report". *Rep. Nro. EPA 600/2-79-058*. U.S.
3. Reitzel, S., Farquhar, G., *et al.* (1992). "Temporal characterization of municipal solid waste leachate". *Can. J. Civ. Engrg.* Ottawa, (8). pp. 756-767.
4. Straub, W. A., and Lynch, D. R. (1982a). "Models of landfill leaching: Moisture flow and inorganic strength". *J. Engrg. Div., ASCE*, 108(2). pp. 231-250.
5. Monod, J. (1949). "The growth of bacterial cultures". *Ann. Rev. Microbiol.*, 3, 371-385.
6. Straub, W. A., and Lynch, D. R. (1982b). "Models of landfill leaching: Organic strength". *J. Engrg. Div. ASCE*, 108(2). pp. 251-268.
7. Korfiatis, G. and Demetracopoulos, A. (1984) "Moisture transport in a solid waste column". *J. Envir. Engrg. ASCE*, 110(4). pp. 780-796.
8. Demetracopoulos, a. c., Sehayek, L., *et al.* (1986). "Modeling leachate production from municipal landfills". *J. Envir. Engrg. ASCE*, 112(5). pp. 849-866.
9. Colin, F. (1990) "Estude de la modelisation des fonctions assurees par une descharge (Study of the modelization of processes occurring in a landfill)". *Institut de recherches hydrologiques*. Nancy, France.
10. Gonullo, M. T. (1994). "Analytical modeling of organic contaminants in leachate". *Waste Mgmt. And Res.*, 12 (4). pp. 141-150.
11. Wing, R. J. (1979). "Boone County field site interim report". *Rep No. EPA 600/2-79-058*, U.S. EPA.
12. Ehrig, H. J. (1988). "Water and Element Balances of Landfills". *Earth Sciences, The Landfill*. New York. P. Baccini Ed. pp. 83-115.
13. Pohland, F. G. (1980). "Leachate recycle as landfill management option". *J. Envir. Engrg. Div. ASCE*, 106(6). pp. 1.057-1.069.
14. Tittlebaum, M. E. (1982). "Organic carbón conten stabilization though landfill leachate recirculation". *J. Water pollution Control Fed.* 54(5). pp. 428-433.