

Número de dispersión en un sistema de lagunas de estabilización

Ing. Edith Alayón Castro* e Ing. Jairo A. Romero Rojas**

* Ingeniera química, especialista en Hidrología Isotópica, M.Sc. Ingeniería Ambiental, coordinadora Aguas Subterráneas, CAR, Bogotá.

** I.C., MEEE., profesor asociado Universidad Nacional de Colombia, profesor Escuela Colombiana de Ingeniería.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se incluyen los resultados principales del estudio realizado para obtener el coeficiente de difusividad o número de dispersión, d , en un sistema de lagunas de estabilización, utilizando Yodo 131 como trazador¹.

SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

El sistema seleccionado para la determinación del número de dispersión es uno de los sistemas de tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización de la Sabana de Bogotá, constituido por 2 lagunas en serie y conocido como Chía I.

El sistema de tratamiento CHÍA I está localizado hacia el sur del cruce de la vía Bogotá - Chía - Cajicá, con vertimiento sobre la margen derecha del río Bogotá, al noroccidente de la clínica de reposo San Juan de Dios. El sistema de tratamiento consta de una estructura de entrada, compuesta por un tanque con aliviadero, al cual llega una tubería de diámetro 24", con una pendiente del 0,98%, que transporta el agua residual del sector comprendido entre las calles 9 y 21, y las carreras 2 y 11 del municipio de Chía. Por el costado norte se conecta, ade-

más, una tubería de diámetro 28" con una pendiente de 0,1%, la cual transporta las aguas residuales de la zona suburbana de la vereda Bojacá hasta Tres Esquinas, y del colector de Centro Chía.

La laguna primaria diseñada como laguna anaeróbica, tiene las siguientes características de cálculo².

Tiempo de retención	: 2 d
Caudal	: 100 L/s
Profundidad efectiva	: 4,0 m
Carga orgánica	: 1.110 kg DBO/d
Concentración orgánica	: 128 mg DBO/L
Volumen	: 17.231 m ³
Área total	: 5.412 m ²
Longitud	: 135,3 m
Ancho	: 40 m
Carga volumétrica	: 64 g DBO/m ³ .d
Carga superficial	: 2.051 kg DBO/ha.d
Eficiencia de remoción de DBO	: 50%
Número de pantallas	: 2

La laguna secundaria, diseñada como laguna facultativa, tiene las siguientes características de cálculo².

Tiempo de retención	: 9 d
Profundidad efectiva	: 2,0 m
Carga orgánica	: 555 kg DBO/d
Concentración orgánica	: 64 mg DBO/L
Volumen	: 77.084 m ³
Área total	: 38.542 m ²
Longitud	: 223 m
Ancho	: 196 m
Carga volumétrica	: 7,2 g DBO/m ³ .d
Carga superficial	: 144 kg DBO/ha.d
Carga remanente	: 111 kg DBO/d
Eficiencia de remoción	: 80%
Número de pantallas	: 9

MARCO TEÓRICO

Si se supone que las lagunas de estabilización trabajan bajo condiciones de flujo pistón, la calidad de sus efluentes se determinaría, teóricamente, para cinética de primer orden, con la ecuación:

$$\frac{C_e}{C_i} = e^{-kt} \quad (1)$$

en la cual

- C_e = concentración del efluente, mg/L
- C_i = concentración del afluente, mg/L
- k = constante de reacción de primer orden, d⁻¹
- t = tiempo de retención, d

Las dimensiones determinadas en el terreno son:

	Laguna primaria	Laguna secundaria
Volumen	16.945 m ³	61.871 m ³
Área Total Superficial	5.210 m ²	32.732 m ²
Longitud Superficial	217,7 m	217,97 m
Ancho Superficial	40,8 m	182,25 m

El flujo pistón supone, básicamente, que no hay difusión lateral o mezcla, que todas las partículas viajan a igual velocidad y que el período de flujo iguala el tiempo de retención hidráulico. Por tanto, en la práctica, la ecuación anterior es sólo una aproximación para predecir la concentración del efluente.

Otros investigadores han supuesto que las lagunas de estabilización se comportan como reactores de mezcla completa; la ecuación teórica para calcular la concentración de contaminante, con una cinética de remoción de primer orden, sería:

$$\frac{C_e}{C_i} = \frac{1}{1 + kt} \quad (2)$$

La ecuación de mezcla completa supone que el contenido de la laguna es de composición uniforme, e igual a la del efluente, lo cual tampoco es cierto.

En la práctica el uso de las ecuaciones (1) y (2) lleva a resultados aproximados porque las lagunas de estabilización no trabajan bajo ninguno de estos dos flujos teóricos ideales, no son reactores sin dispersión axial y poseen condiciones arbitrarias de entrada y salida.

Una ecuación para reactor de flujo no ideal con dispersión axial fue desarrollada por Wehner y Wilhem y posteriormente simplificada por Thirumurthi³.

$$\frac{C_e}{C_i} = \frac{4ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} \quad (3)$$

donde

$$a = \sqrt{1 + 4ktd}$$

$$d = \frac{D}{UL} = \frac{Dt}{L^2}$$

en la cual

d = constante de difusividad o número de dispersión, adimensional

D = coeficiente de dispersión axial, m²/h

U = velocidad del fluido, m/h

L = longitud característica de la trayectoria de viaje de una partícula típica en el tanque, m

k = constante de reacción de primer orden, h⁻¹

t = tiempo de retención en horas, h

Dado que la principal dificultad para usar la ecuación (3) es conocer el factor de dispersión d ; algunos autores, entre ellos D. Thirumurthi³, sugieren realizar estudios con trazadores para calcular el número de dispersión y el tiempo de retención real, así como para entender las características de mezcla existentes.

SELECCIÓN DEL TRAZADOR Y MÉTODO DE INYECCIÓN - DETECCIÓN

Se define como trazador cualquier sustancia que, incorporada a la masa de un fluido, permite investigar fielmente el comportamiento del mismo en un proceso físico o químico.

Como trazadores radiactivos se utilizan radioisótopos, obtenidos en reactores nucleares, que se detectan

en el agua a través de las radiaciones emitidas.

A pesar del elevado número de radioisótopos conocidos, sólo unos pocos son utilizados como trazadores en hidrología. El precio y las posibilidades de adquisición, junto con las condiciones exigidas para usos hidrológicos, constituyen las bases principales de selección. Los más comúnmente utilizados, en sistemas de agua, están indicados en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta que el tiempo de tránsito de diseño, de las lagunas de estabilización de Chía I, es de nueve días, se seleccionó el yodo 131, en forma de NaI, como trazador, ya que su período de semidesintegración es de 8,04 días que lo hace compatible con la duración de la experiencia. Adicionalmente, tiene un buen rendimiento gamma y su eficiencia de detección para detectores de NaI (TI) sumergidos en agua es buena.

Otra de las razones para su elección es que es un trazador soluble, estable en el agua y no afecta las condiciones físico-químicas del medio donde se realiza la experiencia.

El proceso de inyección usado consiste en inyectar yodo 131, en forma instantánea, en las entradas a las lagunas, en donde se presenta la mayor turbulencia. Para la laguna primaria la inyección se hizo en la canaleta Parshall y para la laguna secundaria la inyección fue sobre la compuerta de salida de la laguna primaria. En cada una de las lagunas se hicieron tres inyecciones; para la primaria una cantidad promedio de 50 mci y para la secundaria un promedio de 200 mci, para un total de seis ensayos.

Los puntos de detección se localizaron a la salida de las lagunas para determinar el tiempo de residencia total.

El paso del yodo 131 se determinó mediante su medida con un detector de centelleo sumergido. La detección del trazador en la laguna primaria se realizó antes de su compuerta de salida. Para la detección, en la laguna secundaria, se utilizó un tubo de PVC

cerrado, al cual se le introdujo el detector de centelleo, colocado en el vertedero de salida al río, con el fin de evitar errores en el conteo por el movimiento del agua.

El detector del centelleo es el sistema más utilizado para la medida de rayos gamma. Su sensibilidad, para este tipo de radiaciones, es mucho más elevada que la correspondiente a otros detectores, por ejemplo los Geiger - Muller. El detector de centelleo utilizado para esta investigación, tiene incorporado un microprocesador de información que puede ajustarse para recolección de datos con diferentes intervalos de tiempo.

CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE EDAD

La distribución del tiempo de residencia de un trazador está representada por la "curva de distribución de edad"⁴. Esta curva se obtiene experimentalmente, al inyectar instantáneamente en la entrada de la laguna un trazador, en forma de impulso, y medir su concentración, a la salida, en función del tiempo.

El tipo de curva es dimensional, con "C" en función de "t", para:

C = concentración en cuentas por unidad de tiempo

t = tiempo

Para el análisis de las curvas de distribución de edad se utilizan dos conceptos matemáticos: el primero y más importante es el primer momento de la curva C en función de t con respecto al origen. Este concepto define el centro de gravedad de la curva, por el tiempo promedio \bar{t} :

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tCdt}{\int_0^{\infty} Cdt} \quad (4)$$

Si la curva de distribución está referida a valores definidos D t, entonces:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 Cdt}{\int_0^{\infty} Cdt} - 2\bar{t}\bar{t} + \bar{t}^2 \quad (8)$$

Tabla 1
TRAZADORES RADIACTIVOS DE USO COMÚN

Trazador	Forma	Vida media	Observaciones
Yodo (¹³¹ I)	NaI	8,04 días	El más barato
Bromo (⁸² Br)	KBr	36 horas	Más costoso que ¹³¹ I
	NH ₄ Br		
Cromo (⁵¹ Cr)	Cr EDTA	26,5 días	costoso
Cobalto (⁵⁸ Co)	Co (C N) ₆ K ₃	71 días	costoso
Tritio (³ H)	Agua tritiada	12,3 años	Detección en el laboratorio

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \quad (5)$$

La ecuación anterior sirve para el cálculo del período de retención promedio \bar{t} .

El segundo concepto matemático importante es el de la dispersión de la curva, normalmente conocido como la varianza σ^2 . Este parámetro está definido por el segundo momento de la curva C en función de t, con respecto al promedio \bar{t} ; su expresión matemática es:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 Cdt}{\int_0^{\infty} Cdt} \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 Cdt}{\int_0^{\infty} Cdt} - 2\bar{t} \frac{\int_0^{\infty} tCdt}{\int_0^{\infty} Cdt} + \bar{t}^2 \frac{\int_0^{\infty} Cdt}{\int_0^{\infty} Cdt} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 Cdt}{\int_0^{\infty} Cdt} - \bar{t}^2 \quad (9)$$

Nuevamente, para valores uniformes de Δt_i , de la curva se obtiene:

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i}{\sum C_i} - \bar{t}^2 \quad (10)$$

En la ecuación anterior σ^2 es la varianza de la curva C en función de t, tiene dimensiones de (tiempo)² y permite calcular dicho valor a partir de los datos experimentales.

El cálculo del factor de dispersión (d) se efectúa a partir de la varianza en su forma adimensional σ_t^2 ; la cual está definida, a través de conceptos estadísticos, por:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 2d - 2d^2 [1 - e^{-1/d}] \quad (11)$$

$$0 = \sigma_t^2 - 2d + 2d^2 [1 - e^{-1/d}] \quad (12)$$

donde:

- σ_t^2 es la varianza adimensional
- σ^2 es la varianza de la curva C, en función de t, (tiempo)²
- d es el factor de dispersión adimensional
- \bar{t} es el período de retención promedio

El cálculo de d se efectuó con la ecuación (12), por aproximaciones sucesivas, con una hoja electrónica qpro.

En la hoja electrónica quattro pro (qpro), versión 4, mediante la función solve for, se procede a igualar la ecuación (12) a cero. Para cada valor de la varianza adimensional σ^2 , se realizan iteraciones sucesivas hasta encontrar el valor de d que satisfaga la ecuación.

TIEMPOS DE RETENCIÓN Y NÚMERO DE DISPERSIÓN EN LAS LAGUNAS

En la laguna primaria se midió la concentración de trazador durante 12 días y, en la laguna secundaria, durante 35 días; con el fin de construir las respectivas curvas de distribución de edad. Dos de estas curvas se muestran en las figuras 1 y 2.

Un ejemplo de los resultados obtenidos en cada prueba se incluye en la Tabla 2, la cual corresponde a la primera prueba en la laguna primaria.

El cálculo del tiempo de retención promedio \bar{t} se efectúa con la ecuación (5).

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} = \frac{6.432.800}{80.764} = 79,65 \text{ horas} = 3,3 \text{ d}$$

Para determinar el número de dispersión, se calcula primero la varianza σ^2 que caracteriza la dispersión de la curva C_i en función de t_i con la ecuación (10).

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i}{\sum C_i} - \bar{t}^2 = \frac{6,369 \times 10^8}{80.764} - (79,65)^2 = 1541,996$$

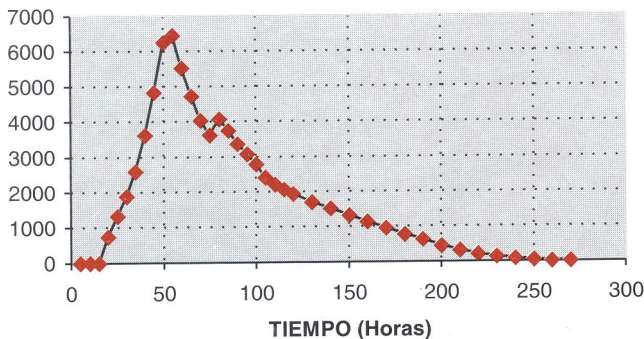


Figura 1. Variación de la concentración con el tiempo. Laguna primaria. Primera prueba. 93-07-30.

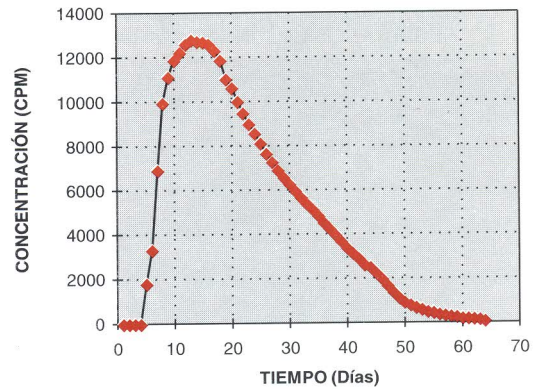


Figura 2. Variación de la concentración con el tiempo. Laguna secundaria. Segunda prueba. 94-06-12.

La varianza adimensional se calcula con la ecuación (11):

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = \frac{1541,996}{(79,65)^2} = 0,2431$$

Finalmente, se calcula el número de dispersión d , con la ecuación (12), por aproximaciones sucesivas, con la hoja electrónica qpro.

La Tabla 3 es un ejemplo de la hoja electrónica qpro, para la primera prueba en la laguna primaria, en donde se iguala la ecuación (12) a cero para el valor de la varianza adimensional σ_t^2 igual a 0,2431. Se realizan varias iteraciones hasta encontrar que la ecuación se cumple cuando d es igual a 0,1416 así:

$$0 = \sigma_t^2 - 2d + 2d^2 \frac{[1 - e^{-t/d}]}{t} \quad (12)$$

$$0 = 0,2431 - 2 * 0,1416 + 2 * (0,1416)^2 * [1 - e^{-1/0,1416}]$$

Por tanto, el valor del número de dispersión para esta primera prueba es 0,1416. Los diferentes resultados experimentales obtenidos se resumen en la Tabla 4.

AFOROS

Se realizaron 63 aforos, con micromolinet, en el canal de acceso a la canaleta Parshall, por donde entra el agua residual cruda del alcantarillado de la población de Chía y en el colector de 29", por donde entra el agua residual cruda de Centro Chía. El valor del caudal diario es la suma de los dos caudales parciales obtenidos en los sitios mencionados anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 2
RESULTADOS LAGUNA PRIMARIA. PRIMERA PRUEBA 93-07-30

t _i Horas	C _i CPM	t _i C _i Horas*CPM	t _i ² (Horas) ²	t _i ² C _i (Horas) ² CPM
0	0	0	0	0
5	0	0	25	0
10	0	0	100	0
15	0	0	225	0
20	750	15000	400	300000
25	1330	33250	625	831250
30	1879	56370	900	1691100
35	2600	91000	1225	3185000
40	3620	144800	1600	5792000
45	4850	218250	2025	9821250
50	6250	312500	2500	15625000
55	6450	354750	3025	19511250
60	5533	331980	3600	19918800
65	4726	307190	4225	19967350
70	4053	283710	4900	19859700
75	3620	271500	5625	20362500
80	4080	326400	6400	26112000
85	3759	319515	7225	27158775
90	3382	304380	8100	27394200
95	3075	292125	9025	27751875
100	2784	278400	10000	27840000
105	2415	253575	11025	26625375
110	2217	243870	12100	26825700
115	2069	237935	13225	27362525
120	1942	233040	14400	27964800
130	1709	222170	16900	28882100
140	1517	212380	19600	29733200
150	1329	199350	22500	29902500
160	1142	182720	25600	29235200
170	958	162860	28900	27686200
180	775	139500	32400	25110000
190	627	119130	36100	22634700
200	457	91400	40000	18280000
210	329	69090	44100	14508900
220	210	46200	48400	10164000
230	144	33120	52900	7617600
240	90	21600	57600	5184000
250	56	14000	62500	3500000
260	25	6500	67600	1690000
270	12	3240	72900	874800
SUMA	80764	6432800	-	636903650

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} = 79,6 \text{ h}; \bar{t}^2 = 6344 \text{ h}^2$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i}{\sum C_i} - \bar{t}^2 = 1542 \text{ h}^2$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 0,2431$$

CONCLUSIONES

El promedio de los 18 caudales medidos en la laguna primaria, durante el año de 1993, es de 57,6 L/s y el promedio de los 45 caudales medidos, durante los años 1994 y 1995, en la laguna secundaria, es de 61,6 L/s.

El tiempo de retención promedio obtenido durante el muestreo, en la laguna primaria, año de 1993, es de 3,1 días, valor típico para lagunas anaeróbicas. En la laguna secundaria el tiempo de retención promedio obtenido, año de 1995, es de 11,2 días, valor típico en lagunas facultativas.

En el sistema de tratamiento, el tiempo de retención promedio equivalente para 1995, con un caudal de 61,6 L/s; sería de 14,1 días.

Los números de dispersión promedio obtenidos: 0,14 y 0,17, para las lagunas primaria y secundaria respectivamente, son valores típicos encontrados en situaciones reales de lagunas de estabilización previamente estudiadas.

Con base en este estudio se puede afirmar que el tipo de flujo predominante para el sistema de tratamiento evaluado es de tipo pistón.

REFERENCIAS

1. ALAYÓN CASTRO, Edith. Determinación del número de dispersión en el sistema de lagunas de estabilización de Chía, Tesis M. Sc. en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá, 1996.
2. SEGURA B., Eduardo. Rediseños del tratamiento de aguas negras, Municipio de Chía, CAR, Bogotá, D.E., 1986, 7 pp.
3. THIRUMURTHI, D. Desing principles of Waste Stabilization Ponds. En: Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 95, (1969); pp. 311-330.
4. YÁÑEZ, C.F. Manual de métodos experimentales. Evaluación de lagunas de estabilización. CEPIS, OPS, Serie Técnica 24, Lima, 1982

Tabla 3
NÚMERO DE DISPERSIÓN LAGUNA PRIMARIA.
PRIMERA PRUEBA 93-07-30

Valores de d	Valores ecuación $0,2431 \cdot 2^*A13 + 2^*A13^2(1 - @EXP(-1/A13))$
0.1200	0.0319
0.1210	0.0304
0.1220	0.0289
0.1230	0.0273
0.1240	0.0258
0.1250	0.0243
0.1260	0.0228
0.1270	0.0213
0.1280	0.0199
0.1290	0.0184
0.1300	0.0169
0.1310	0.0154
0.1320	0.0139
0.1330	0.0125
0.1340	0.0110
0.1350	0.0095
0.1360	0.0081
0.1370	0.0066
0.1380	0.0052
0.1390	0.0037
0.1400	0.0023
0.1410	0.0008
0.1411	0.0007
0.1412	0.0005
0.1413	0.0004
0.1414	0.0003
0.1415	0.0001
0.1416	-0.0000
0.1417	-0.0002
0.1418	-0.0003
0.1419	-0.0005
0.1420	-0.0006
0.1421	-0.0008
0.1422	-0.0009
0.1423	-0.0010
0.1424	-0.0012
0.1425	-0.0013
0.1426	-0.0015

Tabla 4
RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Parámetro	Laguna primaria	Laguna secundaria
Número de dispersión prueba 1	0,14	0,17
Número de dispersión prueba 2	0,14	0,17
Número de dispersión prueba 3	0,15	0,17
Número de dispersión promedio	0,14	0,17
Caudal L/s, prueba 1	56,8	60,5
Caudal L/s, prueba 2	56,9	61,5
Caudal L/s, prueba 3	59,0	62,7
Caudal promedio, L/s	57,6	61,6
Tiempo de retención, d	3,3	11,5
Tiempo de retención, d	3,1	11,2
Tiempo de retención, d	3,0	10,9
Tiempo de retención promedio, d	3,1	11,2

Volvimos a ser la NCR Renovada, Moderna y con liderazgo en

Sistemas de Información y Redes de Comunicaciones

- * Cajeros Automáticos
- * Servidores UNIX/NT
- * Puntos de Venta
- * Scanners
- * Procesadores de Documentos Bancarios
- * Comunicación en Redes
- * Servicios de Consultoría*
- * Soporte de Mantenimiento

Somos Líderes en Colaborar
directamente en el Crecimiento
y Exito de nuestros clientes.



NCR
Colombia S.A.

Carrera 37 N° 30 - 20
Conmutador 368 55 11
Fax 337 99 53
Santafé de Bogotá, D.C.