

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN EL SITIO DE ORIGEN

BEATRIZ AMPARO WILLS¹
SANTIAGO VÉLEZ²
ANDRÉS FELIPE ARBOLEDA³
JUAN PABLO GARCÉS⁴

RESUMEN

Se propone un método para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen, el cual permite establecer de manera representativa su desempeño, asegurando, por medio de la instalación de dos unidades de homogeneización, que todas las cargas contaminantes generadas en la vivienda estarán presentes en la muestra compuesta por analizar en el laboratorio.

PALABRAS CLAVE: evaluación de aguas; aguas residuales domésticas; tratamiento en el sitio de origen.

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR EVALUATION OF ON-SITE DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS

ABSTRACT

A method for the evaluation of domestic onsite wastewater treatment systems is proposed. It allows establishing, in a representative way, the performance of these systems ensuring, by the use of two homogenization units, that all pollutant loads generated in the house will be present in the composed sample to be analyzed in the laboratory.

-
- 1 Ingeniera Sanitaria, Magíster en Ingeniería Ambiental. Jefe del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. bwills@udea.edu.co
 - 2 Ingeniero Ambiental, Magíster en Ingeniería (c), Docente de cátedra en EIA, Universidad de Antioquia y Corporación Universitaria Lasallista. Miembro del grupo de investigación GIGA, Universidad de Antioquia. Ingeniero de Diseño, Innovaqua S. A. Medellín, Colombia. svelez@innovaquasa.com
 - 3 Ingeniero Ambiental, EIA. Jefe Técnico, Wata Compañía de Aguas S. A. Medellín, Colombia. arboleda.felipe@gmail.com
 - 4 Ingeniero Ambiental, Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín, Colombia. amjuanp@eia.edu.co

KEY WORDS: water evaluation; domestic wastewater; onsite treatment.

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS NO LUGAR DE ORIGEM

RESUMO

Propõe-se um método para a avaliação de sistemas de tratamento de esgotos domésticos no lugar de origem, o qual permite estabelecer de maneira representativa seu desempenho, assegurando, por meio da instalação de duas unidades de homogeneização, que todas as cargas contaminantes geradas na moradia estarão presentes na amostra composta por analisar no laboratório.

PALAVRAS-CÓDIGO: avaliação de águas; esgotos domésticos; tratamento no lugar de origem.

1. MARCO TEÓRICO

Tal como lo determinan la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América –EPA– (2002 y 2003) y Butler y Payne (1995), el control de las descargas de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen se convierte en un reto importante para las diferentes autoridades ambientales, pues su uso masivo y su dispersión a lo largo y ancho del planeta imposibilitan el control y evaluación de cada sistema instalado. Así mismo las técnicas de caracterización, tal como se encuentran establecidas en la actualidad (muestreo puntual y muestreo compuesto), no permiten obtener muestras representativas de las aguas residuales y de las aguas tratadas para este tipo de sistemas, dificultando aun más su control. En este trabajo se propone un método de evaluación que puede ser adoptado por las autoridades ambientales y aplicado por los diferentes fabricantes para evaluar el desempeño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen.

Según Levenspiel (2004), la evaluación hidráulica de un reactor consiste en el seguimiento de un trazador mientras lo recorre, con el fin de determinar el tiempo de retención hidráulica (tiempo que permanece un elemento del fluido en el

interior del reactor), el tipo de flujo predominante (pistón, completamente mezclado o no ideal), la presencia de zonas muertas (volúmenes del reactor en que la velocidad del flujo se aproxima a cero y el tiempo de retención hidráulica tiende a infinito), de cortos circuitos (volúmenes del reactor en que la velocidad del flujo tiende a infinito y el tiempo de retención hidráulica tiende a cero) y de recirculaciones (volúmenes de fluido que permanecen dentro del sistema un tiempo superior al tiempo de residencia). Para determinar las características mencionadas puede emplearse el método experimental estímulo-respuesta, descrito por Cánepa (2004), que consiste en estimular el sistema mediante una perturbación y observar su respuesta. El estímulo se logra inyectando un trazador a la entrada del sistema, y la respuesta se obtiene mediante la determinación del trazador a la salida del reactor. En la figura 1 se representa la variación de la concentración del trazador en función del tiempo en reactores con predominio de flujo pistón, de flujo mezclado o de flujo no ideal, cuando la aplicación del trazador se realiza de manera instantánea.

El análisis de balance de masa del trazador es un método práctico y efectivo para aproximarse a las características hidráulicas del reactor; mediante él se pueden desarrollar las curvas de distribución

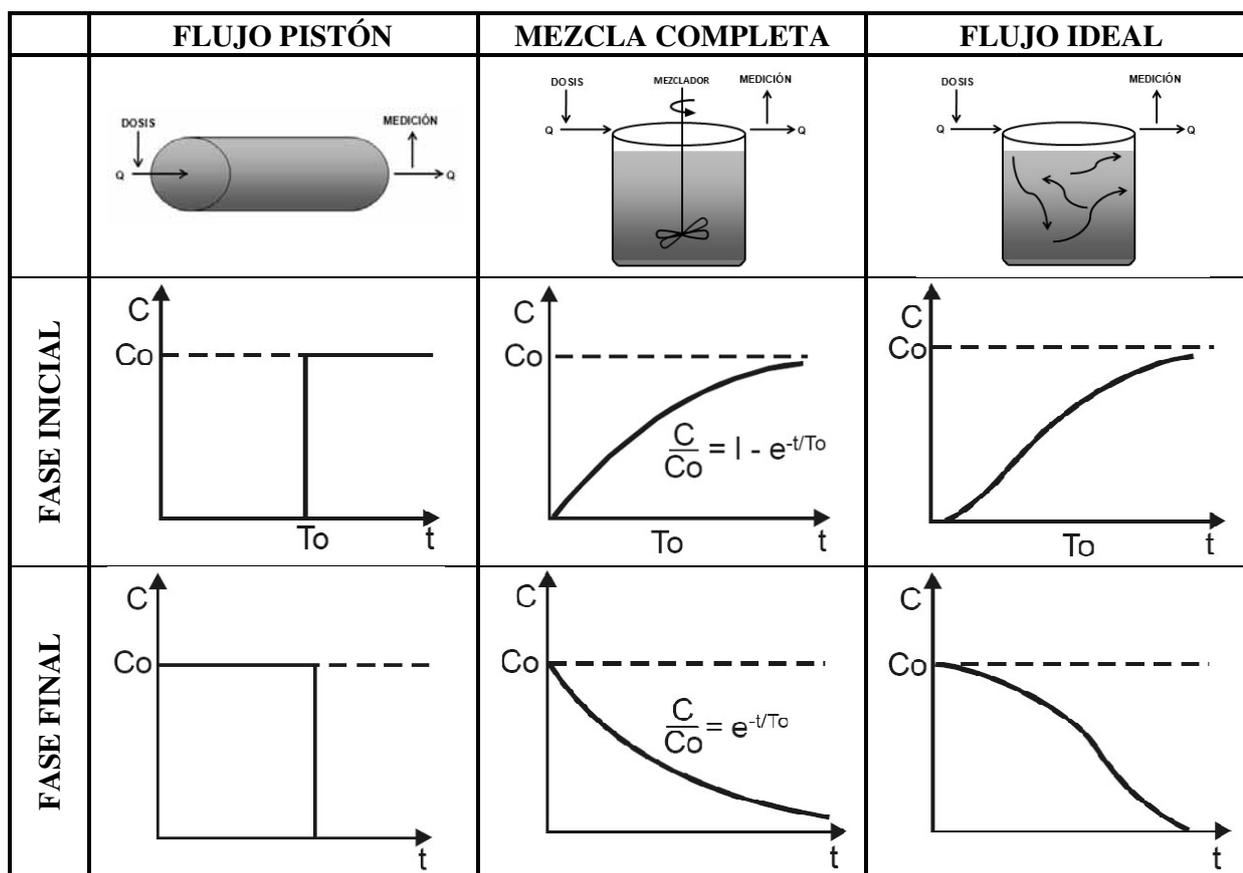


Figura 1. Comportamiento de la concentración del trazador en el efluente de reactores con diferentes regímenes hidráulicos

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy (2003) y Cánepa (2004)

del tiempo de retención hidráulica y obtener índices como el de dispersión de Morrill y el de eficiencia hidráulica del reactor, tal como lo presentan Metcalf y Eddy (2003).

La evaluación técnica de un sistema de tratamiento de aguas residuales consiste en el seguimiento de las características físicoquímicas y microbiológicas del agua, con el fin de determinar su comportamiento o evolución a través del sistema. Para realizarla es necesario establecer un programa de muestreo que permita obtener una muestra representativa a la que se le analizarán los componentes de interés, como lo recomienda el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de

Colombia –IDEAM– (2002). Dada la alta variabilidad que presentan las aguas residuales domésticas, en cuanto a composición (concentración de los contaminantes) y generación (caudal), según estudio realizado por la American Water Works Association –AWWA– (1999), se recomienda para la evaluación de los sistemas de tratamiento el empleo de muestras compuestas proporcionales al caudal.

Tal como lo define el IDEAM (2002), una muestra compuesta se obtiene a partir de la mezcla de varias muestras puntuales tomadas en un mismo sitio de muestreo durante un periodo determinado a intervalos de tiempo constantes. El volumen de cada muestra puntual que hará parte de la muestra

compuesta, también conocido como alícuota, se determina a partir de la ecuación (1):

$$V_i = \frac{Q_i * V}{Q_p * n} \quad (1)$$

Donde:

V_i : Volumen de la alícuota

Q_i : Caudal puntual correspondiente al tiempo de toma de la muestra puntual

V : Volumen total por componer

Q_p : Caudal promedio obtenido durante el período de muestreo

n : Número de muestras puntuales tomadas

El volumen total por componer dependerá de los componentes fisicoquímicos y microbiológicos por evaluar, como lo establece el IDEAM (2003), y el número de muestras puntuales dependerá de la duración del muestreo y de la frecuencia establecida para la toma de muestras, teniendo siempre presente que la duración de muestreo debe ser suficiente como para involucrar todas las actividades que durante el día contribuyen con la generación de aguas residuales; así mismo, la frecuencia de recolección de las muestras debe asegurar la representatividad de la muestra compuesta.

2. METODOLOGÍA

2.1 Evaluación hidráulica

Para la determinación de la distribución de los tiempos de retención del fluido dentro del reactor se recomienda emplear el método estímulo-respuesta, aplicando cloruro de sodio ($NaCl$) como trazador a la entrada del reactor (estímulo) y midiendo la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) a la salida (respuesta).

Tal como recomiendan Gallego (2002) y Cánepa (2004), el trazador se debe aplicar instantáneamente, en forma de impulso, en un intervalo

de tiempo inferior a $1/30$ veces el tiempo teórico de retención, en solución de 1000 mL con una concentración de 15000 ppm. Como fluido para la evaluación se recomienda emplear agua del acueducto con un caudal igual al caudal promedio horario de diseño. Las muestras del efluente se recolectan en un vaso de precipitado para determinarles la concentración de sólidos disueltos totales, cuyos valores establecen la periodicidad a la que se tomará la siguiente muestra, pues cuando la conductividad aumente, el intervalo de muestreo se debe disminuir y viceversa. La evaluación hidráulica se debe prolongar, como mínimo, por tres veces el tiempo de retención hidráulica teórico del reactor, lapso en el cual la concentración del trazador deberá aproximarse a cero.

Para el análisis de la información recopilada de la aplicación del método experimental estímulo-respuesta se propone emplear las curvas de distribución del tiempo de retención hidráulica recomendadas por Metcalf y Eddy (2003), de las cuales se pueden obtener el tiempo de retención hidráulica real, el índice de dispersión, la eficiencia hidráulica y el índice de cortos circuitos.

2.2 Evaluación técnica

Dada la alta variabilidad que presentan las aguas residuales domésticas en cuanto a composición y generación y la dificultad para la toma de muestras (a causa de los bajos caudales que se generan en una vivienda), se propone modificar el método de muestreo compuesto (recomendado por el IDEAM) instalando dos tanques de almacenamiento, ubicados a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento por evaluar, con el fin de acumular y homogeneizar las aguas residuales generadas por un período igual a la frecuencia de muestreo deseada, logrando con esto muestras representativas del agua residual generada en cada período por evaluar. En la figura 2 se presenta una esquematización del método propuesto.

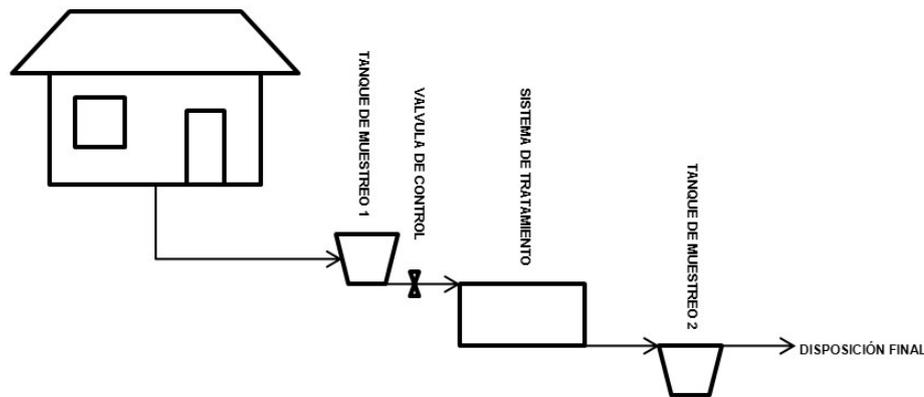


Figura 2. Esquematación del método de evaluación técnica

El tanque a la entrada del sistema de tratamiento debe estar aforado, para permitir la determinación del volumen acumulado, y debe instalarse una válvula de control a la salida; las aguas residuales provenientes de la vivienda deben ingresar por la parte superior del tanque y salir por la inferior. El tanque a la salida del sistema de tratamiento debe instalarse de tal manera que las aguas tratadas entren y salgan por la parte superior. Los tanques de homogeneización deben tener un volumen superior al volumen de aguas residuales correspondiente al caudal máximo horario esperado.

Una vez instalados los tanques de homogeneización, los pasos para realizar la metodología propuesta para la evaluación técnica del sistema de tratamiento son:

1. Cerrar la válvula de control la víspera de la evaluación del sistema, cuando los habitantes de la vivienda se dispongan a dormir.
2. Almacenar las aguas generadas durante una hora en el tanque a la entrada del sistema de tratamiento.
3. Medir el volumen acumulado y determinar el caudal horario.
4. Homogeneizar el volumen de agua acumulado en ambos tanques.

5. Tomar muestra puntual de cada tanque.
6. Medir temperatura y pH.
7. Etiquetar, preservar y almacenar las muestras.
8. Abrir la válvula de control para purgar el agua almacenada y volver a cerrarla.
9. Repetir los pasos 2 al 8 cada hora, durante la jornada de actividad de los habitantes de la vivienda.
10. Al final de la jornada, componer una muestra para las aguas de entrada y otra para las aguas de salida proporcional al caudal horario generado.
11. Llevar las muestras compuestas al laboratorio para analizar las variables seleccionadas para la evaluación del sistema.

3. APLICACIÓN DEL MÉTODO

El método propuesto se aplicó para evaluar el desempeño de un sistema de tratamiento en el sitio de origen, compuesto por un tanque séptico y un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA). En la figura 3 se presenta un plano general del sistema de tratamiento evaluado.

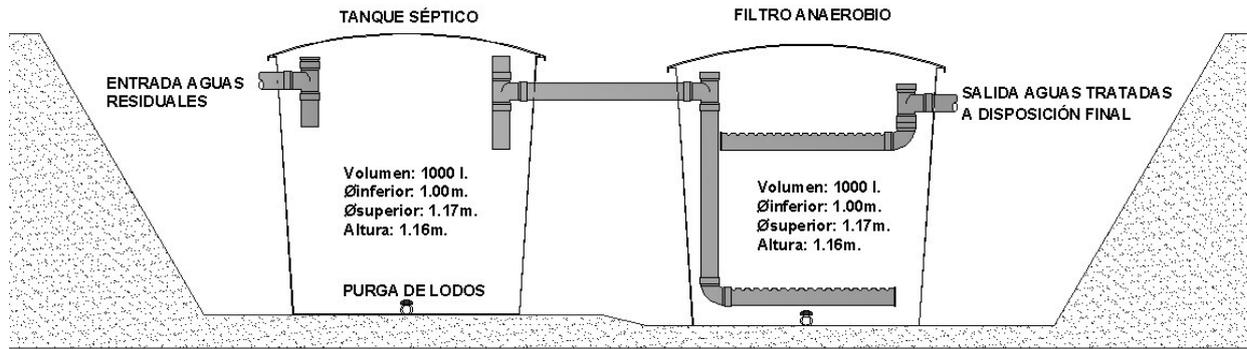


Figura 3. Sistema de tratamiento en el sitio de origen evaluado

3.1 Evaluación hidráulica

La metodología propuesta para la evaluación hidráulica del sistema de tratamiento se aplicó durante 36 horas para cada reactor (tanque séptico y filtro anaerobio), periodo en el cual se pudo obtener la distribución de la concentración del trazador dentro de cada reactor con respecto al tiempo, como se presenta en la figura 4.

Una vez obtenidas las curvas de distribución de los tiempos de retención hidráulica, se procedió a normalizar los valores de la concentración del trazador dividiéndolos por una función apropiada, de tal manera que el área bajo la curva normalizada fuera igual a 1. La curva normalizada se conoce como la curva E o función de distribución de los tiempos de retención hidráulica y se encuentra definida por:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (2)$$

Los valores de la curva E se relacionan con los valores de la concentración del trazador a partir de la ecuación:

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (3)$$

Así mismo puede obtenerse la curva de distribución acumulativa de los tiempos de retención

hidráulica, también conocida como curva F , la cual se define por la ecuación :

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (4)$$

Los valores normalizados de la concentración del trazador y su variación con respecto al tiempo para el tanque séptico y el filtro anaerobio, es decir las curvas E y F , se representan en las figuras 5 y 6.

De los valores normalizados de la concentración del trazador y su variación con respecto al tiempo se obtienen los tiempos medios de retención hidráulica reales (\bar{t}) para cada uno de los reactores aplicando la ecuación (5):

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t E(t) dt \quad (5)$$

$$\bar{t}_{\text{tanque séptico}} = 1611,6 \text{ minutos}$$

$$\bar{t}_{\text{filtro anaerobio}} = 1103,5 \text{ minutos}$$

Así mismo puede obtenerse la variación de la fracción acumulativa de la concentración del trazador con respecto al tiempo para cada reactor, como se presenta en la figura 7.

Por último, con el fin de caracterizar el comportamiento hidráulico de cada uno de los reactores, se determinan los índices de desempeño presentados en la tabla 1.

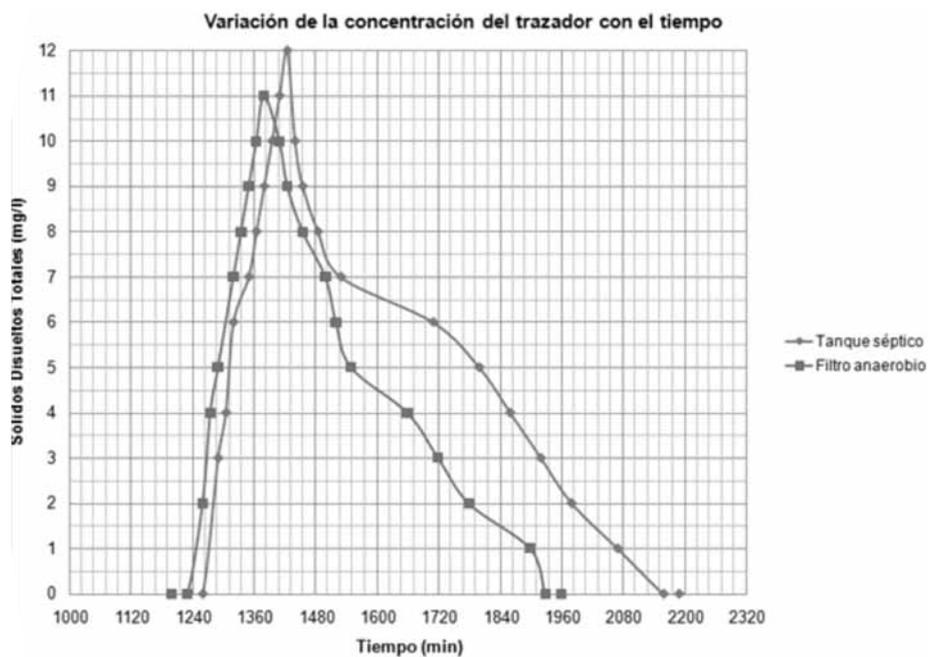


Figura 4. Distribución de la concentración del trazador con respecto al tiempo

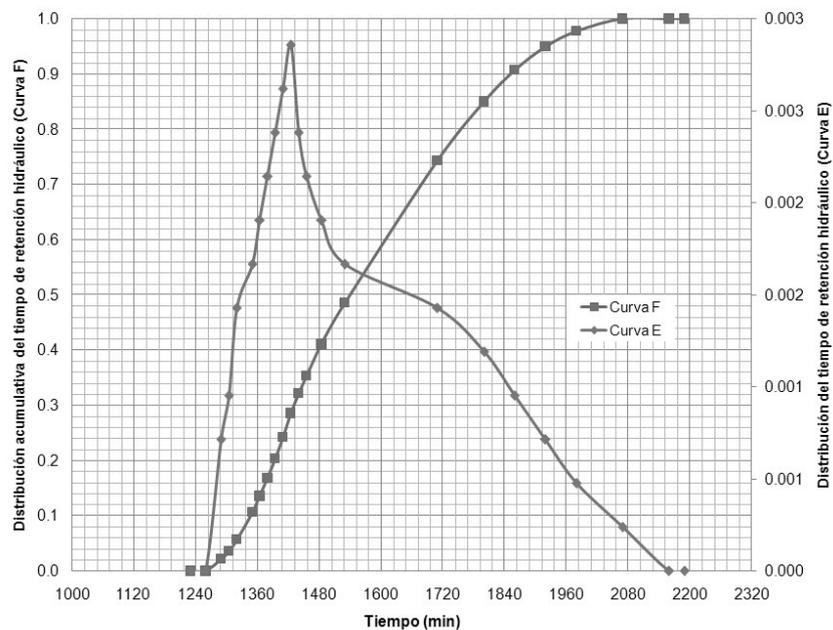


Figura 5. Curvas de distribución de los tiempos de retención hidráulica para el tanque séptico

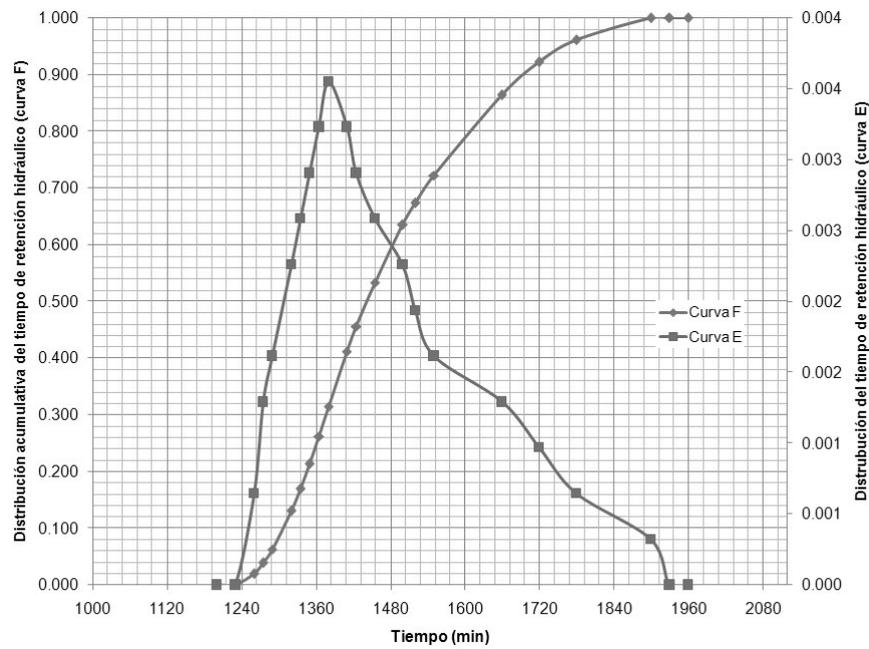


Figura 6. Curvas de distribución de los tiempos de retención hidráulica para el FAFA

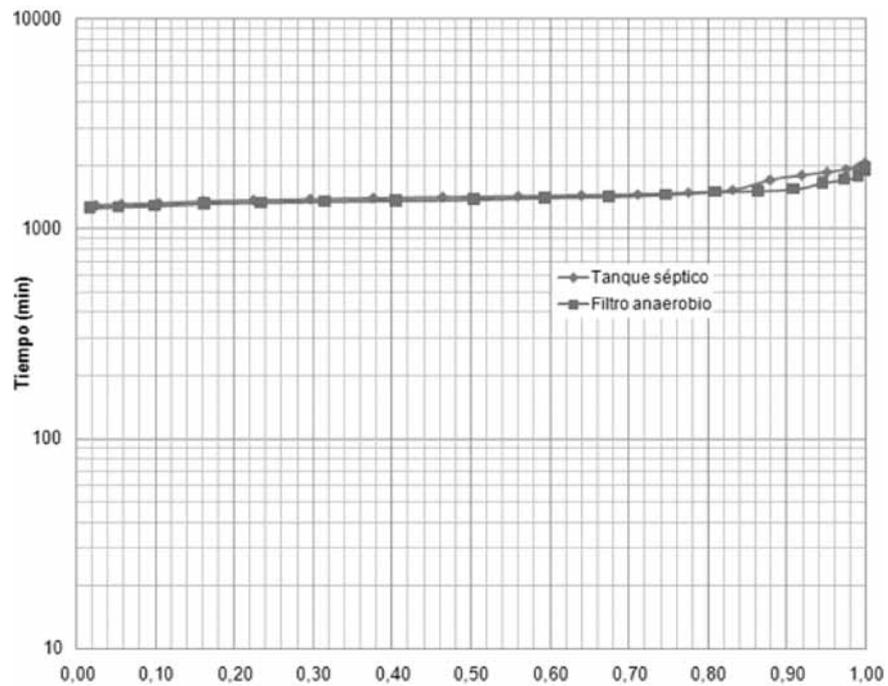


Figura 7. Fracción acumulativa de la concentración del trazador



Tabla 1. Índices de desempeño hidráulico para cada reactor

Índice	Término	Valor		Descripción
		T. Séptico	F. Anaerobio	
Índice de dispersión de Morrill (MDI)	t_{90}/t_{10}	1,33	1,20	El valor del MDI para un reactor ideal tipo flujo pistón es de 1 y para un reactor tipo mezcla completa es de 22. La EPA considera como reactor tipo flujo pistón aquel que presente un MDI inferior a 2.
Eficiencia volumétrica	$1/MDI$	75,2 %	83,2 %	La eficiencia volumétrica indica qué porcentaje del reactor se comporta como un reactor ideal tipo flujo pistón.
Índice de corto circuito	t_i/θ	1,01	0,98	Para reactores ideales tipo flujo pistón el índice de corto circuito se aproxima a 1, mientras que para reactores de mezcla completa se aproxima a 0.
Índice de tiempo de retención modal	t_p/θ	1,11	1,08	Para reactores ideales tipo flujo pistón el índice de tiempo de retención modal se aproxima a 1, mientras que para reactores de mezcla completa se aproxima a 0. Los valores de este índice superiores a 1 indican que la distribución del flujo dentro del reactor no es uniforme.
Índice de tiempo de retención promedio	\bar{t}/θ	1,26	1,17	Para el índice de tiempo de retención promedio un valor de 1 indica que se está empleando el total del volumen del reactor. Los valores inferiores o superiores a 1 indican una distribución no uniforme del flujo.

Fuente: Metcalf y Eddy (2003)

Donde:

t_{90} : tiempo en el que el 90% del trazador ha atravesado el reactor.

t_{10} : tiempo en el que el 10% del trazador ha atravesado el reactor.

t_i : tiempo inicial en el que el trazador aparece en el efluente.

t_p : tiempo en el cual se presenta la mayor concentración del trazador.

\bar{t} : tiempo medio de retención hidráulico real

θ : tiempo de retención hidráulico teórico

3.2 Evaluación técnica

El método propuesto para la evaluación técnica del sistema de tratamiento se aplicó durante cuatro diferentes días de una semana, buscando abarcar al máximo las posibles variaciones en las actividades diarias que puedan afectar la composición o generación de las aguas residuales. Durante cada jornada de caracterización se tomaron muestras puntuales, cada hora, en el afluente y en el efluente. Para cada muestra puntual se determinó caudal, pH y temperatura, y al final de cada jornada se conformaron dos muestras compuestas (una para el afluente y otra para el efluente) para evaluarles la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

Para la evaluación técnica del sistema de tratamiento se emplearon las aguas residuales provenientes de una vivienda en la cual, durante el periodo de evaluación, habitaba en forma permanente una familia de estrato 2 compuesta por cinco miembros (tres adultos y dos niños), ubicada en la sede de pregrado de la Escuela de Ingeniería de Antioquia en el alto de Las Palmas, municipio de Envigado.

En la figura 8 se presenta la distribución de la generación de las aguas residuales en el tiempo para cada uno de los días de evaluación.

Con base en la distribución de la generación de las aguas residuales en el tiempo se obtuvo esta información:

- El consumo per cápita promedio es de 148,4 litros/habitante/día.
- El caudal máximo horario es de 300 L/h.
- Un 85,3 % del volumen total de las aguas residuales se genera en un periodo de 8 horas, el restante 14,7 % se genera en un periodo de 10 horas.

En las figuras 9 y 10 se presenta la variación del pH y de la temperatura con respecto al tiempo, para el afluente y el efluente.

Los valores de pH afluente y efluente se encuentran en un intervalo neutro, con una leve disminución en el efluente, lo cual podría interpretarse como un indicador de actividad de bacterias fermentativas en el sistema de tratamiento.

Tanto la temperatura del afluente como del efluente se encuentran en el intervalo psicrófilo (12-18 °C), lo cual no favorece el desarrollo y desempeño de la biomasa encargada de la degradación de la materia orgánica. Por otro lado, la disminución de la temperatura que presenta el efluente con respecto al afluente puede interpretarse como un indicador de una baja o nula actividad microbiológica en el sistema de tratamiento.

En las tablas 2 y 3 se presenta el desempeño del sistema de tratamiento en remoción de carga orgánica, medida en términos de DQO y SST.

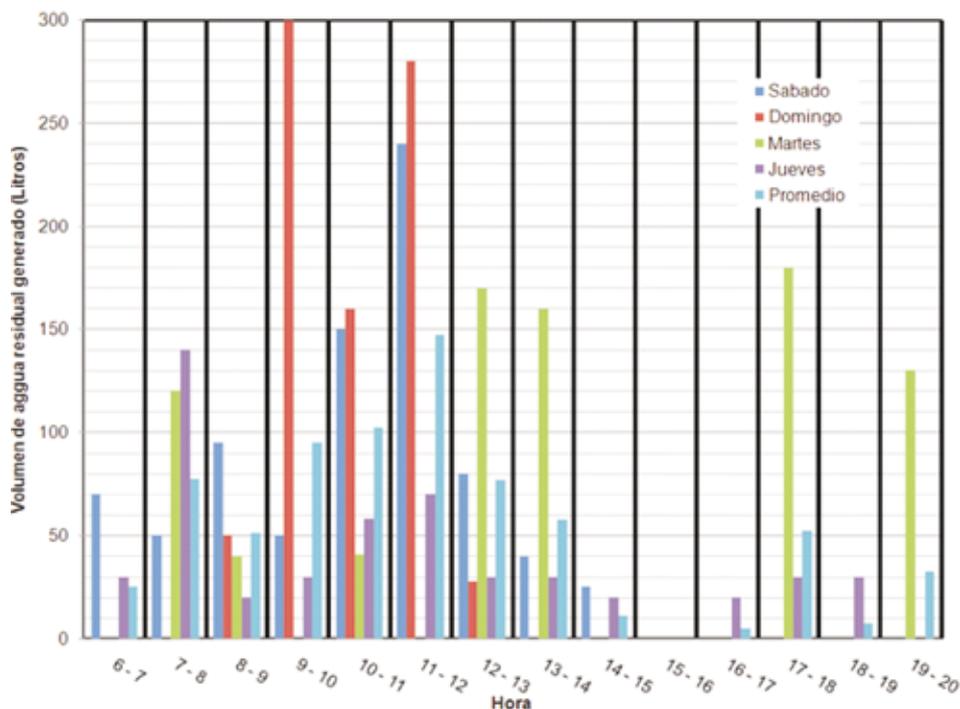


Figura 8. Distribución de las aguas residuales en el tiempo

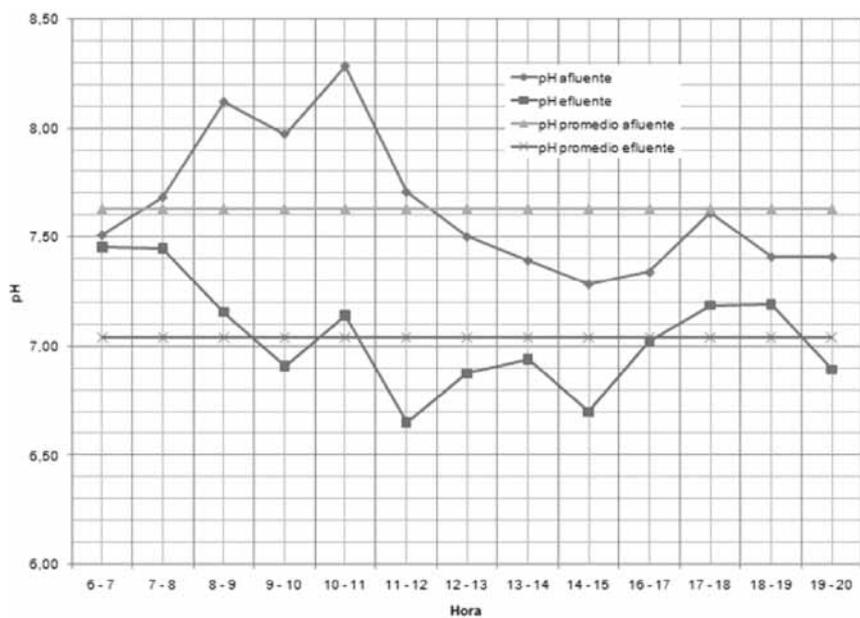


Figura 9. Variación del pH con el tiempo

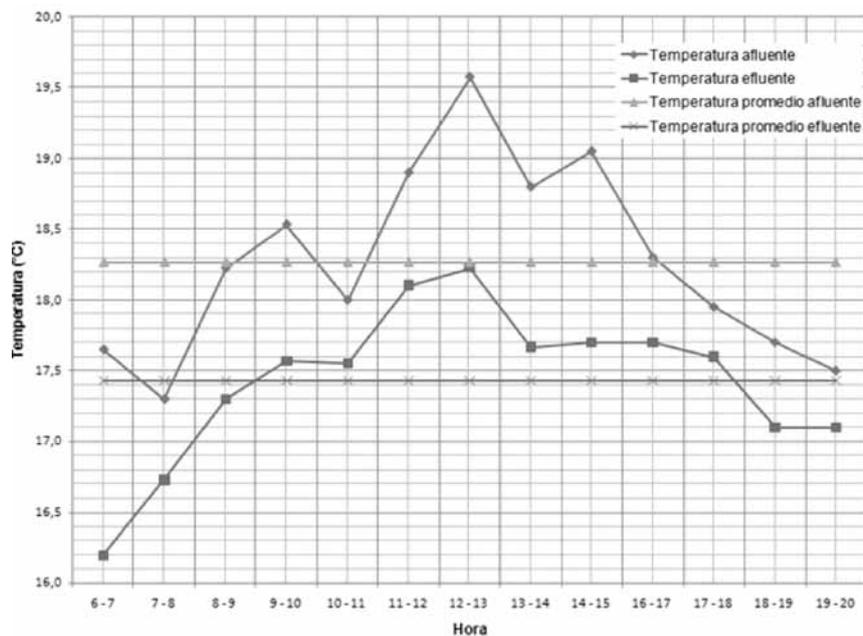


Figura 10. Variación de la temperatura con el tiempo

Tabla 2. Evaluación de la remoción en carga de DQO

Demanda química de oxígeno (DQO)					
Día	Concentración (mg/L)		Carga (kg/día)		Eficiencia de remoción (%)
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
Sábado	712,00	186,00	1,52	0,40	74
Domingo	624,00	376,00	2,45	1,48	40
Martes	808,00	252,00	2,33	0,73	69
Jueves	543,00	317,00	0,55	0,32	42
Promedio	671,75	282,75	1,71	0,73	57

Tabla 3. Evaluación de la remoción en carga de SST

Sólidos suspendidos totales (SST)					
Día	Concentración (mg/L)		Carga (kg/día)		Eficiencia de remoción (%)
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
Sábado	384,00	28,00	0,82	0,06	93
Domingo	323,00	55,00	1,27	0,22	83
Martes	350,00	53,00	1,37	0,21	85
Jueves	588,00	36,00	0,60	0,04	94
Promedio	411,25	43,00	1,01	0,13	89

Una eficiencia de remoción en carga orgánica como DQO muy inferior a la eficiencia en remoción en carga de SST, relacionada con los valores de temperatura y pH vistos, puede ser un indicador de que en la remoción de contaminación en el sistema de tratamiento están predominando los procesos físicos sobre los biológicos.

4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para la evaluación hidráulica y técnica de sistemas de tratamiento en el origen permite un acercamiento representativo a

la calidad y a la generación de las aguas residuales en la vivienda y de su evolución a través de las unidades de tratamiento, contrario a los resultados que se pueden obtener con los métodos tradicionales.

Las autoridades ambientales pueden estudiar y poner a la consideración de los diferentes fabricantes de sistemas de tratamiento de aguas residuales en el origen la aplicación de la metodología propuesta. Su aplicación en al menos un sistema instalado les permitirá determinar su desempeño y, con base en este, avalar o no su uso masivo o, cuando sea factible, introducir ajustes a los sistemas evaluados.



REFERENCIAS

AWWA. *Indoor residential water use. AWWA research foundation report: residential end uses of water*. 1999.

Butler D. and Payne J. (1995). "Septic tanks: problems and practice". *Building and Environment*, vol. 30, No. 3, pp. 419-425.

Cánepa de Vargas, Lidia (coordinadora). *Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS–, Organización Panamericana de la Salud –OPS–, Lima, Perú, 2004.

Environmental Protection Agency –EPA–. *Voluntary national guidelines for management of onsite and clustered (decentralized) wastewater treatment systems*. EPA, United States, 2003.

Environmental Protection Agency –EPA–. *Onsite wastewater treatment systems manual*. EPA, United States, 2002.

Gallego Suárez, Darío. *Manual para el estudio del comportamiento hidráulico de un reactor continuo con los modelos de un factor*. Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Postgrado. Medellín, 2002.

IDEAM. *Temas ambientales: toma y preservación de muestras*. Bogotá, Colombia, 2003.

IDEAM. *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. Bogotá, Colombia, 2002.

Levenspiel, Octave. *Ingeniería de las reacciones químicas*. 3 ed. México: Limusa Wiley, 2004. 688 p.

Metcalf & Eddy. *Wastewater engineering, treatment and reuse*. 4 ed. McGraw-Hill, United States of America, 2003.