

## ESTUDIO CINÉTICO E HIDRÁULICO DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO A ESCALA REAL

N. Alasino<sup>(1,2)</sup>, F. Nadal<sup>(2)</sup>, L. Primo<sup>(2)</sup>, P. Bollo<sup>(2)</sup> y N. Larrosa<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> IDTQ- Grupo Vinculado PLAPIQUI – CONICET

<sup>(2)</sup> Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria. C.P. 5000, Córdoba, Argentina  
E-mail: nalasino@gmail.com

### INTRODUCCIÓN

Los humedales, durante el transcurso del tiempo, pueden cambiar las condiciones bajo las cuales fueron diseñados y construidos, incidiendo notablemente en los resultados esperados. En este trabajo se presentan estudios realizados a los dos años posteriores a la puesta en funcionamiento del humedal de flujo subsuperficial horizontal con *Cortadeiraselloana* construido para tratar efluente cloacal, en el mes de junio de 2010 en dependencias de la Universidad Nacional de Córdoba (-31° 26' 21.29", -64° 11' 28.47"). Para el diseño del humedal y cálculo de sus dimensiones se consideró al humedal como un RFP con cinética de degradación de materia orgánica de primer orden (Ecuación 1):

$$\frac{DBO_5 \text{ efluente}}{DBO_5 \text{ afluente}} = e^{-k\tau} \quad (1)$$

donde  $DBO_5 \text{ efluente}$  y  $DBO_5 \text{ afluente}$  son las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) en el efluente y afluente respectivamente;  $k$  es la constante de velocidad cinética y  $\tau$  es el tiempo de retención hidráulica. Para  $\tau$  se aplicó la Ecuación 2:

$$\tau = \frac{(LWh)\varepsilon}{v} \quad (2)$$

donde  $L$  es el largo,  $W$  el ancho y  $h$  la profundidad del humedal,  $\varepsilon$  la porosidad del lecho y  $v$  el caudal volumétrico de efluente. Se consideró para su diseño un caudal ( $v$ ) de 700 L/d (caudal que trató desde julio de 2010 a febrero de 2011) y una  $DBO_5 \text{ afluente}$  de 240 mgO<sub>2</sub>/L,  $DBO_5 \text{ efluente}$  de 30 mgO<sub>2</sub>/L (valor exigido por la DIPAS (1999) para descarga directa en embalse),  $\varepsilon$  de 0.38,  $k_{estimada}$  de 0.73 d<sup>-1</sup>,  $h$  de 0.5 m y relación  $L/W = 3$ . Las dimensiones finales de la celda fueron de 2.1 m de ancho y 5.1 m de largo, dando un  $\tau$  teórico de 2.9 días (Nadal, 2010). A partir de marzo de 2011 el caudal de ingreso al humedal disminuyó a aproximadamente 222 L/d promedio.

### MÉTODOS

En 2011 y 2012 se realizaron varios estudios, entre ellos:

**Ensayo de trazador para determinación de  $\tau$  experimental y evaluación hidrodinámica.** Se empleó el método de *distribución de tiempos de residencia* (DTR) descrito en Levenspiel (2004). Como trazador se utilizó NaCl, inyectándose al sistema de manera instantánea a la entrada del humedal, 300 g de la sal disueltos en 2 litros de agua. Diariamente se midieron la conductividad y caudal del efluente hasta observar los valores normales de conductividad del agua residual tratada. Para la medición de conductividad se utilizó una sonda multiparamétrica marca Horiba U-10.

**Evaluación cinética.** Para la evaluación de la constante cinética se asumió una reacción de primer orden (Kadlec, 2003) y se utilizaron las concentraciones de  $DBO_5 \text{ afluente}$  y  $DBO_5 \text{ efluente}$  obtenidos en ensayos realizados según APHA 2005.

**Desarrollo de software de simulación.** Se desarrolló un programa de simulación escribiendo un modelo matemático en el lenguaje Visual Basic 6.0 de Microsoft con las Ecuaciones 1 y 2 presentadas en este trabajo y la constante cinética obtenida. Permite simular escenarios para calcular y graficar la  $DBO_5 \text{ efluente}$  modificando cualquiera de las siguientes cinco variables: dimensiones ( $L$ ,  $W$  y  $h$ ) del humedal;  $\varepsilon$  del lecho;  $DBO_5 \text{ afluente}$ ; caudal  $v$  o las precipitaciones. Para simular la situación de lluvia, se incorporaron ecuaciones para considerar el agua aportada por ésta al sistema.

### RESULTADOS

La Figura 1 muestra la curva de distribución de tiempo de residencia en octubre de 2012. Se obtuvo un  $t_M$  de 11.7 días. Se comparó la curva DTR obtenida y las

curvas de reactores no ideales (Levenspiel, 2004) proponiendo un modelo hidrodinámico para el humedal formado por dos RFP con dispersión en paralelo. Se propuso que cada uno de los RFP pueda ser representado por una función de distribución normal ( $f_1(\theta)$  y  $f_2(\theta)$ ) caracterizada por sus parámetros *media* (tiempo de residencia normalizado de cada reactor,  $\theta_1$  y  $\theta_2$ ) y *desviación estandar* (dispersión de cada uno de éstos). Se propuso que la suma ponderada de  $f_1(\theta)$  y  $f_2(\theta)$  según la fracción de flujo, dé como resultado a una función  $f(\theta)$ :

$$a f_1(\theta) + b f_2(\theta) = f(\theta) \quad (3)$$

con  $a$  y  $b$  factores de ponderación de las funciones  $f_1(\theta)$  y  $f_2(\theta)$  respectivamente, que indican la fracción de flujo. Finalmente, se hace uso de la herramienta *Solver* de Excel para optimizar los parámetros de  $f_1(\theta)$  y  $f_2(\theta)$  (tiempos medios de residencia y desviaciones estándar) a los fines de obtener la mayor correlación ( $R^2$ ) entre la función  $f(\theta)$  y la curva DTR del humedal. Se obtuvo un  $\theta_1$  de 0.550 y un módulo de dispersión de 0.194 para el primer RFP y la fracción de flujo de 0.400; mientras que para el segundo RFP el  $\theta_2$  obtenido fue de 1.257; el módulo de dispersión ( $D/\mu L$ ) de 0.246 y la fracción de flujo de 0.600. El valor del  $R^2$  encontrado en la optimización fue de 0.896 indicando una muy buena correlación.

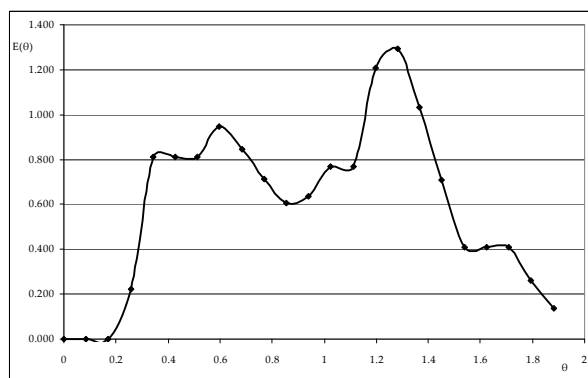


Fig. 1. Curva de DTR obtenida luego de 28 meses de construido el humedal

Con el tiempo de residencia medio experimental (11.7 d) y la Ecuación 1 se calculó la constante cinética, utilizando tres pares de datos de concentraciones de  $DBO_5$  *afluente* y  $DBO_5$  *efluente* medidas entre septiembre de 2011 y mayo de 2012. Se determinó como constante de reacción  $k = 0.115$  1/d. Se validó dicha constante con los datos registrados en 2010, cuando el caudal de alimentación era diferente (en 2010 era de 700 L/d y desde febrero de 2011 fue de aproximadamente 222 L/d).

El software de simulación admite: un volumen de la celda ( $L W h$ ) de 0 a 16  $m^3$ , un  $\varepsilon$  de 0.3 a 0.6, un  $v$  (caudal diario) de 0 a 1  $m^3/d$ ,  $DBO_5$  *afluente* de 0 a 400  $mg O_2/L$ , y lluvias de 0 a 60  $mm/d$ . Cabe destacar que el modelo solo puede utilizarse en humedales que empleen para la

remoción *Cortaderiaselloanaya* que ésta define la cinética del sistema y que el mismo no contempla variaciones de la remoción con la temperatura. Sin embargo se podría hacer extensivo a otra vegetación (con otros valores de  $k$ ) y contemplar la variación con la temperatura, introduciendo las variables correspondientes al programa. Para el sistema actual de volumen ( $L W h = 5.1 \times 2.1 \times 0.5$ ) de 5.355  $m^3$ ,  $\varepsilon = 0.486$ ,  $v = 0.22$   $m^3/d$ ,  $DBO_5$  *afluente* = 123  $mg O_2/L$  y en ausencia de lluvias, las simulaciones dan un  $DBO_5$  *efluente* de 32  $mg O_2/L$ , y no sería apto para descarga a cuerpo de agua superficial, de 30  $mg O_2/L$  (DIPAS, 1999). Se simularon situaciones variando de a una, cada una de estas variables para establecer los límites admisibles. Por ejemplo, en situaciones de lluvia se observó que el agua aportada por la lluvia tiene dos efectos encontrados en el sistema: a- un efecto desfavorable ya que disminuye el tiempo de residencia y así la remoción de materia orgánica, aumentando el  $DBO_5$  *efluente*; y b- un efecto favorable ya que disminuye la  $DBO_5$  *afluente aparente en situaciones de lluvia* por un efecto de dilución, disminuyendo la  $DBO_5$  *efluente*. El primer efecto se observa hasta valores de precipitaciones de hasta 18  $mm$  de lluvia, sin embargo, se observa que el efecto de la dilución prioriza a partir de ese valor, obteniéndose un efluente con una  $DBO_5$  menor que los días sin lluvia.

## CONCLUSIONES

Se pudo detectar que el sistema en estudio no se comporta según el modelo hidrodinámico supuesto para su diseño, sino que se asemeja a un sistema conformado por dos RFP con dispersión en paralelo. Se obtuvo una *constante de reacción* para la eliminación de materia orgánica considerando un modelo de RFP y una cinética de remoción de primer orden, de  $k = 0.115$   $d^{-1}$ . La simulación permitió conocer *a priori* la concentración de materia orgánica del efluente del humedal para situaciones de interés. Se destaca la importancia de realizar estudios con sistemas a escalas reales y monitorearlos en el tiempo ya que las raíces de la vegetación, la acumulación de sólidos, el asentamiento de la grava, las depresiones en el suelo por el peso de la celda, son factores que hacen que el sistema se modifique y cambie su funcionamiento.

## REFERENCIAS

- APHA (American Public Health Association), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21<sup>th</sup> edition, Washington, D.C., 2005.
- DIPAS. Normas para la protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la provincia de Córdoba – Decreto Provincial 415/99, 1999.
- Levenspiel, O. Ingeniería de las reacciones químicas. 2da



*III Reunión Interdisciplinaria de Tecnología y Procesos Químicos*

*Los Cocos – Córdoba – Argentina*

*13 al 16 de abril de 2014*

edición. Ed. Reverté, p 638, 2002.

Nadal, F. Propuestas de sistemas de remediación sanitaria para localidades serranas: Caso Potrero de Garay. Proyecto final integrador de grado. FCEfyN. UNC, 2010.