

DESARROLLO DEL MODELO DE DIMENSIONAMIENTO DE HUMEDALES FLOTANTES EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS BIODEGRADABLES.

Javier Carbonell. Ingeniero Agrónomo. Consejero Delegado de QuarQ Enterprise S.A.

a. Antecedentes.

El uso de macrofitas flotantes en tratamiento de aguas residuales se comenzó a estudiar, al menos, desde los años 70 del siglo XX.

En la literatura científica disponible existe un amplio espectro de aplicaciones que hacen referencia a macrófitos en flotación para el tratamiento de agua. La mayoría de los estudios contempla el uso de especies ya flotantes tales como el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia repens*) o la Salvinia (*Salvinia* spp.), mientras que solo uno de los estudios encontrados hace referencia a *Typha* spp. (como macrófito emergente en flotación). La mayoría han demostrado eficiencias de eliminación significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales, industriales y de escorrentía.



Asimismo, la literatura muestra cómo el diseño de los sistemas implementados es muy variado, con un amplio rango de escalas, de especies de plantas utilizadas, de características del agua afluente, etc. De manera que los datos existentes son muy dispersos y no permiten obtener conclusiones generalizadas sobre los sistemas de tratamiento de agua residual con macrófitas flotantes en particular.

A finales de los años 90 del Siglo XX, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), a través del Grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal, desarrolló un sistema de humedal artificial que utiliza plantas de tipo emergente, que de forma natural se encuentran enraizadas en el terreno (plantas helófitas), pero que se transforman artificialmente en flotantes.

De este modo, hasta 2014, según la literatura científica disponible, no se conocía bien el funcionamiento de estos sistemas.

Aunque, de manera general, los mecanismos involucrados en la depuración del agua residual por medio de macrófitas flotantes transformadas artificialmente en flotantes son principalmente: la filtración y sedimentación de sólidos; la incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado; la degradación de la materia orgánica y los nutrientes por los microorganismos, se desconocía la contribución relativa de cada uno de ellos, lo que impedía el desarrollo técnico de la tecnología y el correcto dimensionamiento de las instalaciones.

Pese a ello, entre 2008 y 2014 se ejecutaron más de 80 depuradoras de aguas residuales urbanas en Castilla la Mancha de las que la mayoría siguen en funcionamiento. Un estudio de dichas instalaciones permite sacar las siguientes conclusiones:

- **No existía un criterio de diseño en cuanto a las etapas de depuración necesarias** (algunas de las más antiguas carecen incluso de pretratamiento y muchas de ellas carecen de fase anaerobia, lo que ha supuesto a lo largo de los años la pérdida de tiempo de retención efectivo debido a la deposición de lodos).
- **No existía un criterio dimensionamiento:** la mayoría de las instalaciones están dimensionadas considerando un criterio de carga superficial pero no se consideran, **ni criterios hidráulicos** (se obvia el caudal tratado, el tiempo de retención y la relación de forma de las balsas) **ni criterios cinéticos** (no considera la temperatura).
- Los diseños fueron variando a lo largo de los años introduciendo cada vez más elementos en el mismo con objeto de subsanar las deficiencias de las primeras instalaciones
- **En general, puede decirse que los diseños y dimensionamientos se basaron en el ensayo/error.**

A la vista de la información recabada en las instalaciones existentes (principalmente en Castilla la Mancha), **Quarq Enterprise S.A.** se propuso en 2014 el desarrollo del modelo de diseño y dimensionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante **helófitas en flotación**.

Para ello desarrolló el "Proyecto de investigación de biotecnología para el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante fitodepuración", proyecto Cofinanciado por el Fondo Europeo de desarrollo regional e ICEX/Invest in Spain.

El proyecto se desarrolló en una planta de tratamiento de aguas residuales experimental ejecutada al efecto junto a la EDAR convencional de Villafranco del Guadiana, pedanía de Badajoz.

La planta experimental incluye 3 balsas impermeabilizadas en paralelo con tamices vegetales en flotación. Con objeto de poder estudiar las variables que afectan a la capacidad de remoción de contaminantes, cada una de las balsas tiene una relación de forma distinta ($1/4$, $1/3$ y $1/2$) y se han diseñado de forma que permita la variación de la profundidad de la lámina de agua a 0,5 m, 1 m, 1,5 m y 2 m. Como fase anaerobia se empleó un decantador- digester convencional.

La planta cuenta con un sistema de reparto de caudal que permite distribuir a cada balsa **idéntico caudal** (con lo que la carga superficial sería mayor y el tiempo de retención sería menor en la balsa más pequeña) **o bien idéntica carga superficial** (con lo que todas las balsas funcionarían con igual carga y tiempo de retención pero con distinta velocidad de flujo).

Este diseño experimental ha permitido un conocimiento exhaustivo del funcionamiento hidráulico del sistema y de la cinética de remoción de carga.

Para el diseño de la planta experimental, el diseño de los ensayos hidráulicos, el tratamiento de los datos analíticos experimentales y el desarrollo del modelo de dimensionamiento, en el proyecto de investigación ha participado, como centro de investigación contratado por Quarq Enterprise, el Grupo de Ingeniería y Microbiología del Medio Ambiente (GEMMA) del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Los datos y el modelo empleados por QUARQ ENTERPRISE en el dimensionamiento de los sistemas de depuración de aguas residuales mediante tamices de helófitas en flotación se basan en la información recogida en el informe final del proyecto de investigación elaborado por el grupo GEMMA: **“MODELIZACIÓN HIDRÁULICA Y CINÉTICA DE SISTEMAS DE HELÓFITOS EN FLOTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL URBANA.”**, realizado en mayo de 2016 y cuyos autores son Cristina Ávila, Alessandro Solimeno, Joan García, Vicente Vasco y Javier Carbonell, así como en el modelo de dimensionamiento posteriormente ajustado y calibrado mediante la aplicación del mismo a los datos de explotación de depuradoras de aguas residuales urbanas con tamices vegetales en flotación existentes.

b. Estudio hidráulico del sistema.

Los parámetros que determinan el funcionamiento hidráulico del sistema fueron establecidos durante el desarrollo del proyecto de investigación anteriormente indicado.

Para ello se realizaron 2 ensayos con un trazador (bromuro) y se estudió la concentración de trazador a la salida y la tasa de recuperación:

El objeto de los ensayos fue la determinación de los siguientes parámetros experimentales:

- **Función de distribución del tiempo de retención hidráulico (DTR)**, la cual en realidad es una función de densidad de probabilidad que representa el tiempo en que las diferentes fracciones de agua permanecen en la balsa de helófitos en flotación.
- **Tiempo de retención hidráulico real medio (TRH)** que es el tiempo medio durante el cual el agua permanece en la balsa de helófitos en flotación, y se obtiene a partir de la función de DTR.
- **Tiempo de demora (t_d)**, que es el tiempo transcurrido hasta que el trazador alcanza la salida por primera vez, el cual se obtiene directamente de la curva de respuesta del trazador.

- **Varianza normalizada** (una medida de la variabilidad de la curva de respuesta del trazador sobre el TRH real medio), que puede ser usada como una medida de los procesos dispersivos en las balsas de helófitos en flotación.
- **Número de dispersión (D)**, que es un parámetro usado para caracterizar el grado de condiciones de flujo no ideal del modelo de flujo en pistón (FP) y que se obtiene a partir de la varianza normalizada.

Los resultados del ensayo con trazadores en la balsa 2 (relación de forma 1:3) son los recogidos a continuación:

Tabla 4. Valores de los parámetros que definen el comportamiento hidráulico de la balsa de helófitos en flotación durante el segundo ensayo de trazador. Nota: "adim" significa adimensional.

	τ_n	τ	σ_θ^2	$\mathcal{D}^{(a)}$	t_p	λ
Balsa	(días)	(días)	(adim)	(adim)	(días)	(adim)
2	6,26	6,48	0,38	0,058	4,2	0,67

a) calculado asumiendo condiciones de contorno "closed-closed" (Ecuación 8).

A la vista de los resultados se concluye:

- El tiempo de retención hidráulico real medio y el tiempo de retención nominal (considerando el volumen de la balsa sin considerar el volumen ocupado por el tamiz vegetal) son prácticamente idénticos (la diferencia entre ambos valores es del 3,5%). De hecho, experimentalmente, el tiempo de retención real medio es ligeramente superior al tiempo de retención nominal, lo que se achaca a la incertidumbre de los datos de entrada. Por ello, se determinó aplicar a los cálculos de la cinética de remoción de carga el tiempo de retención nominal sin considerar el volumen ocupado por el tamiz vegetal.
- El número de dispersión experimental para una balsa con tamiz de helófitas en flotación con relación de forma 1:3 es de 0,058 (adimensional), que se redondea a 0,06 en los modelos de dimensionamiento utilizados por Quarq Enterprise.

c. Estudio cinético del sistema

Una vez determinados los parámetros hidráulicos aplicables al modelo de dimensionamiento, durante el desarrollo del proyecto de investigación arriba indicado se acometieron los ensayos necesarios para la determinación de los parámetros cinéticos que rigen los procesos de remoción de carga contaminante (DBO5).

Por tanto, el objetivo principal de esta segunda fase de investigación fue la **determinación experimental de la constante cinética de primer orden de remoción de DBO (K_{20})** en condiciones experimentales para balsas con láminas de agua de 0,5 m y 1,5 m.

Como ha quedado anteriormente indicado, el tiempo de retención hidráulico para la determinación de las constantes cinéticas fue el nominal por lo que la posible pérdida de volumen efectivo debido al tamiz vegetal ya está considerada en el valor de la constante cinética empleada en los modelos de dimensionamiento.

Para la realización de dichos estudios se llevó a cabo la adquisición de los datos analíticos necesarios para el desarrollo posterior del modelo matemático de dimensionamiento.

En cuanto a la configuración del sistema a lo largo del ensayo, el mismo fue el reflejado a continuación.

Semana	Variable	Balsa 1	Balsa 2	Balsa 3
1	h (m)	1,5	1,5	1,5
	Q	Q1	Q1	Q1
	Cs	Cs1.1	Cs1.2	Cs1.3
2	h (m)	1,5	1,5	1,5
	Q	Q2	Q2	Q2
	Cs	Cs2.1	Cs2.2	Cs2.3
3	h (m)	1,5	1,5	1,5
	Q	Q3	Q3	Q3
	Cs	Cs3.1	Cs3.2	Cs3.3
4	h (m)	1,5	1,5	1,5
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs1	Cs1	Cs1
5	h (m)	1,5	1,5	1,5
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs2	Cs2	Cs2
6	h (m)	1,5	1,5	1,5
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs3	Cs3	Cs3
7	h (m)	2,0	2,0	2,0
	Q	Q1	Q1	Q1
	Cs	Cs1.1	Cs1.2	Cs1.3
8	h (m)	2,0	2,0	2,0
	Q	Q2	Q2	Q2
	Cs	Cs2.1	Cs2.2	Cs2.3
9	h (m)	2,0	2,0	2,0
	Q	Q3	Q3	Q3
	Cs	Cs3.1	Cs3.2	Cs3.3
10	h (m)	2,0	2,0	2,0
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs1	Cs1	Cs1
11	h (m)	2,0	2,0	2,0
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs2	Cs2	Cs2
12	h (m)	2,0	2,0	2,0
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs3	Cs3	Cs3
13	h (m)	1,0	1,0	1,0
	Q	Q1	Q1	Q1
	Cs	Cs1.1	Cs1.2	Cs1.3
14	h (m)	1,0	1,0	1,0
	Q	Q2	Q2	Q2
	Cs	Cs2.1	Cs2.2	Cs2.3
15	h (m)	1,0	1,0	1,0
	Q	Q3	Q3	Q3
	Cs	Cs3.1	Cs3.2	Cs3.3
16	h (m)	1,0	1,0	1,0
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs1	Cs1	Cs1
17	h (m)	1,0	1,0	1,0
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs2	Cs2	Cs2
18	h (m)	1,0	1,0	1,0
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs3	Cs3	Cs3
19	h (m)	0,5	0,5	0,5
	Q	Q1	Q1	Q1
	Cs	Cs1.1	Cs1.2	Cs1.3
20	h (m)	0,5	0,5	0,5
	Q	Q2	Q2	Q2
	Cs	Cs2.1	Cs2.2	Cs2.3
21	h (m)	0,5	0,5	0,5
	Q	Q3	Q3	Q3
	Cs	Cs3.1	Cs3.2	Cs3.3
22	h (m)	0,5	0,5	0,5
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs1	Cs1	Cs1
23	h (m)	0,5	0,5	0,5
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs2	Cs2	Cs2
24	h (m)	0,5	0,5	0,5
	Q	n.p.	n.p.	n.p.
	Cs	Cs3	Cs3	Cs3

Donde:

- **h** es la altura de la lámina de agua
- **Q** es el caudal de entrada
- **Cs** es la carga superficial (g/m²)
- **Q1** es el 50% del caudal de diseño según los criterios previos (definidos en función de los datos de explotación de las EDARu existentes).
- **Q2** es el caudal de diseño según los criterios previos (definidos en función de los datos de explotación de las EDARu existentes).

- **Q3** es el 150 % del caudal de diseño según los criterios previos (definidos en función de los datos de explotación de las EDARu existentes).
- $C_{s,i}$ es la carga superficial calculada para la balsa I con el caudal Q_i .
- **Cs1** es el 50 % de la carga superficial de diseño según los criterios previos (definidos en función de los datos de explotación de las EDARu existentes).
- **Cs2** es la carga superficial de diseño según los criterios previos (definidos en función de los datos de explotación de las EDARu existentes).
- **Cs3** es el 150% de la carga superficial de diseño según los criterios previos (definidos en función de los datos de explotación de las EDARu existentes)
- **n.p.** Indica que dicho valor se calculó en función de los datos analíticos de DBO de entrada en cada momento

Una vez obtenidos los datos analíticos correspondientes, los mismos fueron aplicados por parte de **QUARQ ENTERPRISE** a los modelos matemáticos existentes con objeto de valorar de forma preliminar el ajuste de los mismos a los datos experimentales. En concreto, se aplicaron a 2 modelos preexistentes:

- Modelo cinético aplicado por Reed a humedales de construido de flujo subsuperficial.
- Modelo basado en la carga superficial aplicado por Arthur al diseño de la etapa facultativa de los sistemas de lagunaje.

Este tratamiento preliminar de los datos permitió descartar el modelo basado en carga superficial y **centrar el estudio de los datos en base a un modelo de flujo pistón** con objeto de determinar las variables que rigen el mismo y sistemas con tamices vegetales en flotación, tratamiento de datos realizado por el grupo GEMMA.

d. Simplificación del modelo de dimensionamiento

Una vez recabado la totalidad de los datos, se definió un término reactivo a las ecuaciones de transporte, integrado por ecuaciones diferenciales del modelo bioquímico.

La aplicación del modelo de flujo pistón con los parámetros hidráulicos anteriormente determinados concluyó con la determinación experimental de las constantes cinéticas de primer orden de remoción de DBO5 en balsas con láminas de agua de 0,5 m y 1,5 m.

Los modelos basados en elementos finitos son capaces de reproducir de forma muy fiable el comportamiento de sistemas complejos como balsas con tamices de helófitas en flotación. No obstante, por su dificultad, deben ser ejecutados por especialistas y por ello su aplicación en el campo de la ingeniería ambiental es relativamente limitado. Por ello, el grupo GEMMA realizó una simplificación del modelo para que con ecuaciones analíticas, y mediante el uso de hojas de cálculo se pueda usar fácilmente el modelo de dimensionamiento. **Este modelo es el empleado por QUARQ ENTERPRISE para sus diseños de EDAR.**

Variables a introducir			Variable a verificar			
Factor	Valor	Unidades	Variable	Valor	Unidades	
Caudal afluente	Q	7,05	m ³ /d	Tiempo de permanencia t	6,48	d
Caudal efluente	Q	8E-05	m ³ /s			
Concentración afluente	Co	87	mg/L			
Concentración efluente	C	43	mg/L			
Profundidad	h	0,5	m			

Parámetros calibrados			
Parámetro	Valor	Unidades	
Constante de cinética de 1er orden	k	0,11	d ⁻¹
Número de dispersión	D	0,06	-

Modelo de Wehner and Wilhelm	
$C/C_0 = 4ae^{-kD} / (1+a)^2 e^{-kD} - (1-a)^2 e^{-kD}$	
$a = (1+4kKD)^{0,5}$	1,082
C/Co	0,49
$4ae^{-kD} / (1+a)^2 e^{-kD} - (1-a)^2 e^{-kD}$	0,50
$t = V/Q = LHW/Q, r = L/W$	
$W = (Qr/kH)^{0,5}$	

Resultados			
Dimensiones	Valor	Unidades	
Ancho	W	6	m
Largo	L	17	m
Profundidad	h	0,5	m

Figura. Imagen de la herramienta de dimensionamiento usada durante el proceso de calibración de la constante de cinética de primer orden. Segundo ensayo de trazadores.

e. Ajuste del modelo de dimensionamiento

Una vez disponible el modelo de dimensionamiento en condiciones experimentales, se procedió por parte de Quarq Enterprise a aplicar el mismo a los datos existentes y disponibles de varias de las depuradoras de aguas residuales urbanas con tamices de helófitas en flotación existentes con objeto de contrastar las constantes cinéticas obtenidas durante el proyecto de investigación con las estimadas en instalaciones en funcionamiento, adoptando así un criterio conservador a efectos de dimensionamiento.

Como resultado del ajuste del modelo se obtuvieron las siguientes constantes cinéticas de primer orden de remoción de DBO en balsas con tamices de helófitas en flotación:

K20 para balsas con humedales flotantes = K20_{aquarq}	a	CERRADO
h=1,5 m		
K20 para balsas con humedales flotantes = K20_{aquarq}	a	CERRADO
h=0,5 m		

Estos valores de constantes cinéticas para balsas con humedales flotantes para altura de lámina de agua de 1,5 y 0,5 son propiedad de Quarq Enterprise S.A. y deberán ser tratados como información confidencial.

La K20_{aquarq} se abrirá en este año para facilitar a los profesionales del sector un método fiable de cálculo de los humedales flotantes, facilitándose previo pedido confidencial la hoja de cálculo y manual de uso con ejemplos solo con el compromiso de su uso personal.

Hasta tanto, el cálculo y el diseño se facilitarán de forma gratuita por ASEGO SL ingeniería, bajo petición personal y de un caso en concreto.

APLICACIÓN DEL MODELO DE DIMENSIONAMIENTO

Tal como ha quedado indicado, el modelo de dimensionamiento del sistema de helófitas en flotación ha sido desarrollado para Quarq Enterprise por el grupo GEMMA - Grupo de Ingeniería y Microbiología del Medio Ambiente en el marco del Proyecto de investigación de biotecnología para el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante fitodepuración en el T.M. de Badajoz y ajustado con datos de explotación reales.

Para el dimensionamiento del sistema se ha determinado experimentalmente como modelo teórico más próximo a las condiciones de operación real el modelo de flujo pistón con dispersión incluyendo un término reactivo de primer orden en condiciones "open-open". Por ello, la solución analítica empleada es la ecuación propuesta por Wehner and Wilhelm en 1956:

$$\frac{C'}{C_0} = \frac{4a \exp\left(\frac{1}{2D}\right)}{(1+a)^2 \exp\left(\frac{a}{2D}\right) - (1-a)^2 \exp\left(-\frac{a}{2D}\right)}, \text{ donde:}$$

- C_0 es la concentración de DBO a la entrada del sistema
- C es la concentración de DBO a la salida del sistema
- D es el número de dispersión dependiente de la relación de forma del sistema y obtenido experimentalmente para sistemas de helófitas en flotación en el marco del proyecto de investigación arriba mencionado. Así, para balsas con helófitas en flotación con una relación de forma 1/3 su valor es de 0,06.

$$a = (1 + 4ktD)^{0,5} \text{ . Donde:}$$

- t es el tiempo de retención hidráulico del sistema que es el parámetro a obtener de cara al dimensionamiento del sistema.

- *K* es la constante cinética de primer orden para remoción de DBO en sistemas de helófitas en flotación, dependiente fundamentalmente de la temperatura de forma que:

$$k_T = k_{20} (\theta)^{(T-20^\circ)}$$

, donde:

- T es la temperatura media del agua del mes más frío en °C (en ausencia de este dato se toma como valor de cálculo la temperatura media del mes más frío)
- K_{20} es la constante cinética de primer orden para remoción de DBO en sistemas de helófitas en flotación a 20°C, obtenido experimentalmente para sistemas de helófitas en flotación en el marco del proyecto de investigación arriba mencionado y corregido mediante aplicación del modelo de dimensionamiento a datos de EDARs de helófitas en flotación en operación real. Esta constante ha sido calculada empíricamente por QuarQ Enterprise para cada profundidad de balsa con helófitas en flotación en el marco del proyecto de investigación arriba mencionado. Así, para balsas de helófitas en flotación con 1,5 m de profundidad adquiere un valor de **CERRADO** y balsas de helófitas en flotación con 0,5 m de profundidad adquiere un valor de **CERRADO**.
- $\theta = 1,06$ (según datos de la EPA validados empíricamente por QuarQ Enterprise).



Javier Carbonell, Consejero de QuarQ Enterprise, en la planta experimental donde se ha desarrollado el modelo de dimensionamiento de humedales en flotación e inventor del modelo de utilidad de la estructura flotante AQ3M usada en la formación del tamiz de helofitas (con typhas seleccionadas).