

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Los humedales de flujo subsuperficial donde se ha llevado a cabo este estudio se sitúan en Les Franqueses del Vallès (Vallès Oriental, Barcelona) y tratan el agua de la urbanización Can Suquet. Esta urbanización tiene habitualmente una población de 104 habitantes, pero en verano puede llegar a los 210 (los humedales están diseñados para una población de 230 habitantes). Presenta clima mediterráneo con temperatura media de 13,5 °C y lluvia anual acumulada de 460 mm (datos del año 2000).

Los humedales forman parte del proyecto “Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal como alternativa de tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos urbanos”, coordinado por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en colaboración con el Centro Superior de Investigación y Ciencia (CSIC). Este sistema de tratamiento se construyó para cumplir la Directiva 91/271 de la Unión Europea, que establece en su artículo 7 que los núcleos de menos de 2000 habitantes deben depurar sus aguas antes de verterlas al medio natural antes del año 2006.

La Tabla 4.1 contiene los parámetros utilizados para el diseño y ejecución de la planta.

*Tabla 4.1: Resumen de datos del proyecto constructivo del sistema de tratamiento de aguas residuales de Can Suquet (Ruiz et al., 2000)*

| <b>Parámetro</b>         | <b>Valor</b>            |
|--------------------------|-------------------------|
| Habitantes               | 230 habitantes          |
| Dotación en invierno     | 210 l/(hab·d)           |
| Dotación en verano       | 240 l/(hab·d)           |
| Caudal medio diario      | 57,5 m <sup>3</sup> /d  |
| Caudal punta diario      | 86,25 m <sup>3</sup> /d |
| Caudal punta horario     | 15,3 m <sup>3</sup> /h  |
| DBO <sub>5</sub> entrada | 200 mg/l                |
| DBO <sub>5</sub> salida  | 20 mg/l                 |
| MES entrada              | 200 mg/l                |
| MES salida               | 25 mg/l                 |

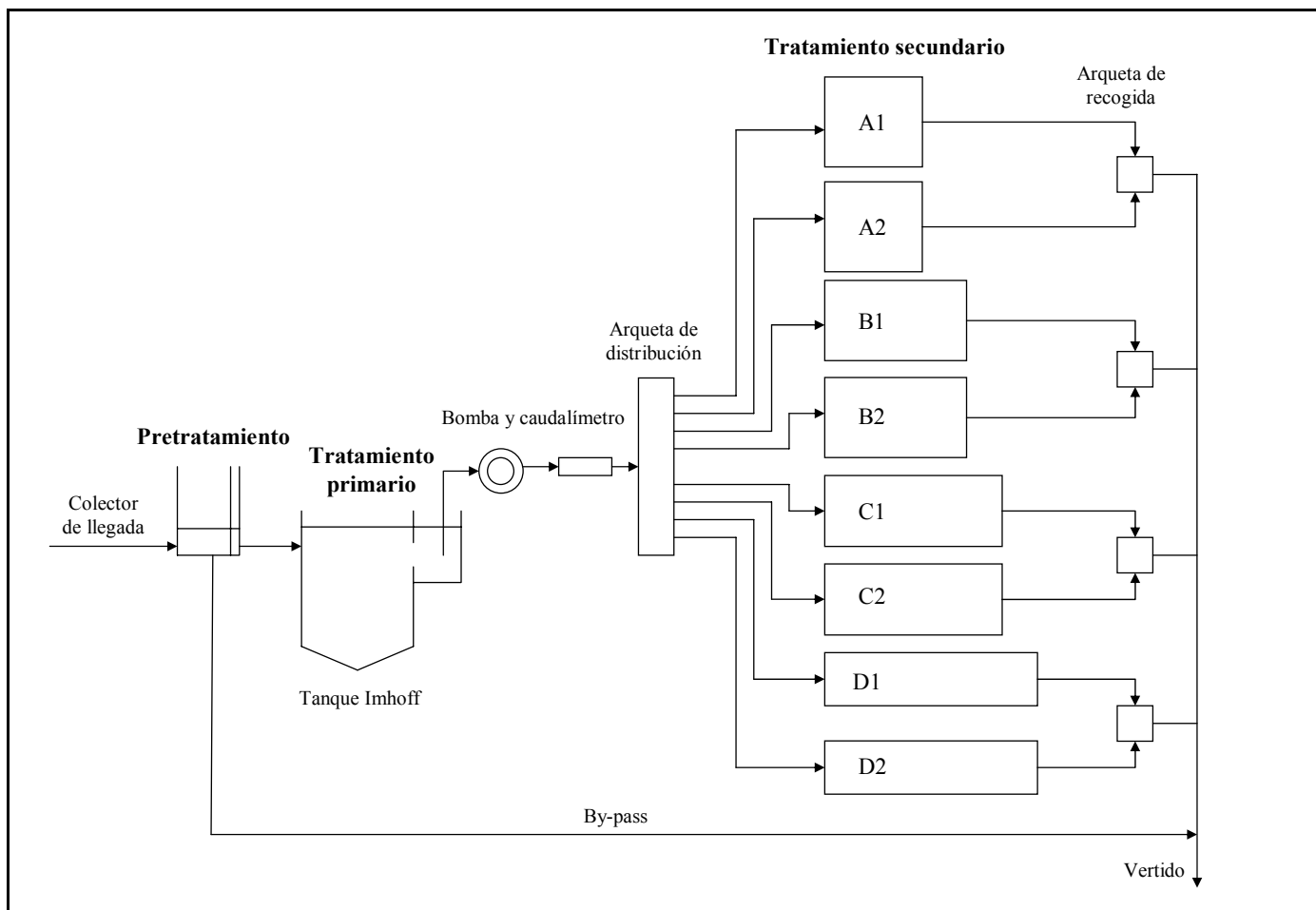


Figura 4.1: Esquema de la planta de tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos de les Franqueses del Vallès

## 4.1. Descripción del sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento de aguas residuales de la urbanización de Can Suquet consta de los siguientes elementos:

- Colector de llegada, by pass y pretratamiento: reja de materia gruesa y desvío para caudales mayores a 15,3 m<sup>3</sup>/h
- Tratamiento primario: tanque Imhoff
- Bombeo de una parte del caudal y conducción a una arqueta de distribución
- Tratamiento secundario: 8 humedales de flujo subsuperficial
- Vertido al cauce público
- By-pass general de planta

La Figura 4.1. muestra un esquema del sistema de tratamiento.

### 4.1.1. Colector de llegada, by-pass y pretratamiento

Para conducir el agua residual desde la urbanización hasta la planta de tratamiento se dispone de un colector de polietileno de 400 mm de diámetro y 400 m de longitud. El colector llega a un arqueta que dispone de un aliviadero para caudales mayores a 15,3 m<sup>3</sup>/h. Esto es necesario puesto que la red de saneamiento de la urbanización de Can Suquet es unitaria y en caso de lluvia es muy fácil superar el caudal de diseño. En caso de que se evacue agua por el aliviadero, ésta será conducida por una tubería de by-pass hasta el final de la zona de tratamiento y será vertido al cauce público sin tratamiento. Se somete este caudal a un pretratamiento consistente en una reja de limpieza manual que elimina los gruesos.

### 4.1.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario consiste en un tanque Imhoff construido de 2,42 m de diámetro y 4,50 m de profundidad enterrado. Estos tanques funcionan como fosas sépticas mejoradas. Constan de dos compartimentos separados. La zona superior es un tanque de decantación. Los sólidos pesados decantan y van a parar al compartimiento inferior. Los sólidos ligeros quedan flotando en la superficie, y los gases producidos son recogidos y expulsados a la atmósfera. El agua residual pasa después directamente a la arqueta de salida. En el compartimiento inferior se produce la digestión del fango a temperatura ambiente. La Figura 4.2 muestra un esquema de funcionamiento de un tanque Imhoff.

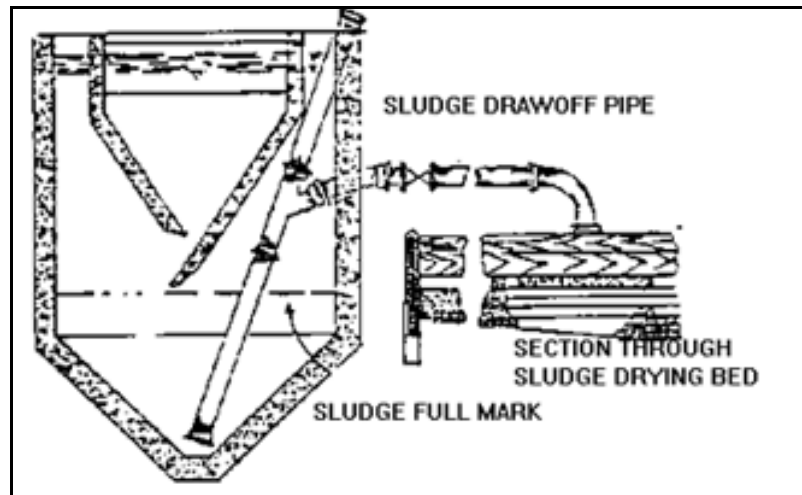


Figura 4.2: Esquema de funcionamiento de un tanque Imhoff.

Una vez ha pasado por el tanque Imhoff, se bombea un caudal conocido hacia la arqueta de distribución.

#### 4.1.3. Tratamiento secundario: humedales de flujo subsuperficial

La planta consta de ocho humedales de flujo subsuperficial en paralelo contruidos por excavación en el terreno, cubiertos por una lámina de polietileno de alta densidad para evitar infiltraciones al subsuelo, y con una pendiente de aproximadamente el 0,5 %. Los humedales se han construido con un volumen similar ( $54 - 56 \text{ m}^3$ ), pero se ha variado su relación largo:ancho (L:W) en grupos de dos. Cada par de humedales, a los que se ha nombrado A, B, C y D, han sido rellenos con gravas distintas. Así distinguimos los de Tipo 1, con grava gruesa ( $D_{60} = 10 \text{ mm}$ ,  $C_u = 1,6$ , porosidad del 39%), y los de Tipo 2, rellenos con grava fina ( $D_{60} = 3,5 \text{ mm}$ ,  $C_u = 1,7$ , porosidad del 40%). Se ajustó el nivel de agua a 5 cm por debajo de la superficie de los humedales. La profundidad es de entre 0,47 y 0,51 m en los humedales A, B y C, y de 0,27 m en los D. Las dimensiones de los humedales están resumidas en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Características físicas de los humedales contruidos en Can Suquet (Ruiz et al., 2000).

| Humedal | L:W   | Longitud (m) | Anchura (m) | Grava $D_{60}$ (mm) | Volumen de agua ( $\text{m}^3$ ) |
|---------|-------|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|
| A1      | 1/1   | 7,5          | 7,5         | 10                  | 10,4                             |
| A2      | 1/1   | 7,5          | 7,5         | 3,5                 | 10,4                             |
| B1      | 1,5/1 | 8,7          | 6,2         | 10                  | 10,4                             |
| B2      | 1,5/1 | 8,7          | 6,2         | 3,5                 | 10,4                             |
| C1      | 2/1   | 10,3         | 5,1         | 10                  | 10,4                             |
| C2      | 2/1   | 10,3         | 5,1         | 3,5                 | 10,4                             |
| D1      | 2,5/1 | 11,6         | 4,8         | 10                  | 6                                |
| D2      | 2,5/1 | 11,6         | 4,8         | 3,5                 | 6                                |

En los humedales se ha plantado carrizo (*Phragmites Australis*), por su capacidad colonizadora mediante rizomas y de transporte de oxígeno hacia la zona anaerobia, por su densidad de crecimiento y por la gran superficie específica que desarrolla para el asentamiento de poblaciones bacterianas.



Figura 4.3: Carrizo (*Phragmites Australis*)

#### 4.1.4. Arqueta de recogida de los humedales y vertido

A la salida de cada humedal hay una tubería de drenaje que lleva a una de las arquetas de recogida. Hay una arqueta para cada dos humedales. Las aguas son posteriormente vertidas al cauce público mediante una tubería que recoge las aguas de las cuatro arquetas de recogida.

## 4.2. Estudio experimental

### 4.2.1. Puntos de muestreo

Para la realización del presente estudio se han tomado muestras de dos de los humedales, el C2 y el D2. Se han definido cinco puntos de muestreo en cada humedal, que corresponden al afluente (común para los dos humedales), el efluente y tres puntos uniformemente distribuidos a lo largo del humedal, esto es a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de la longitud del recorrido del agua. La disposición de estos puntos se muestra en la Figura 4.4.

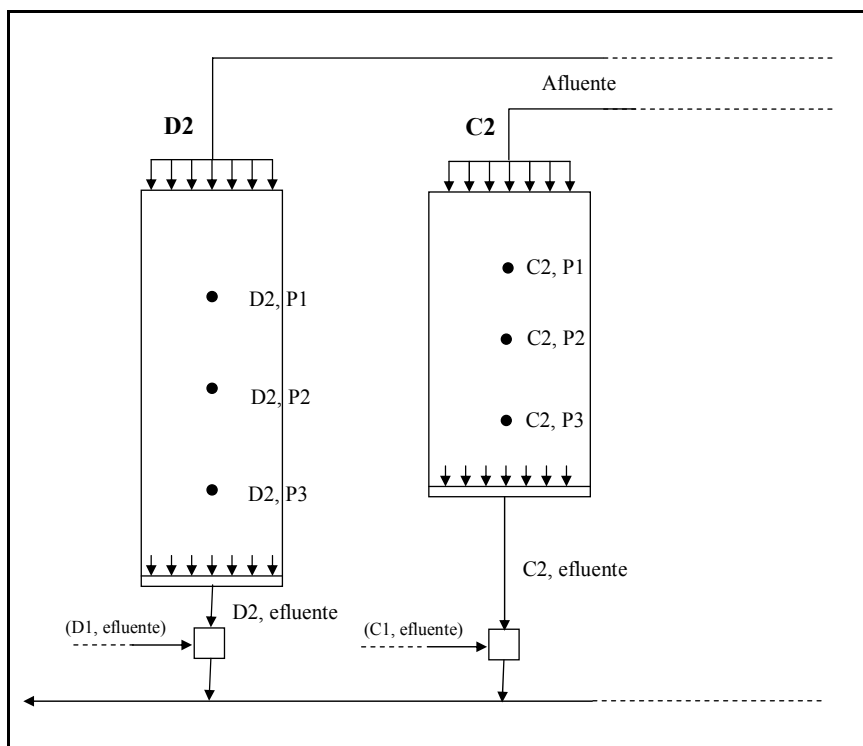


Figura 4.4: Esquema de situación de los puntos de muestreo en los humedales C2 y D2.

#### 4.2.2. Recogida de muestras

Se realizaron cuatro campañas en los meses de junio, julio, agosto y diciembre de 2003, que tuvieron una duración de cinco días cada una. Para que fueran comparables se realizaron todas entre las 9 y las 11 de la mañana.

Las cargas hidráulicas (HLR: *hydraulic load rate*) utilizadas en cada campaña fueron las que se muestran en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3: Cargas hidráulicas utilizadas para cada una de las campañas de muestreo.

|              | Junio | Julio | Agosto | Diciembre |
|--------------|-------|-------|--------|-----------|
| HLR (mm/día) | 41    | 29    | 21     | 29        |

En cada punto de muestro hay un piezómetro. Se introdujo en cada piezómetro una bomba peristáltica que absorbe el agua a una velocidad muy baja para que no se modifique la hidráulica del humedal. Una vez obtenida la muestra, se conserva en la nevera con ácido clorhídrico (HCl) para que el pH se mantenga por debajo de 2.

### 4.2.3. Análisis de muestras

Para determinar la función de distribución de partículas de cada muestra se ha utilizado un instrumento de conteo basado en la conductividad eléctrica de las muestras. El modelo utilizado es un Coulter Multisizer II. Este modelo detecta las partículas en función de los cambios de resistencia de la muestra que fluye entre dos electrodos. La muestra circula entre estos electrodos a través de un conducto de diámetro 100  $\mu\text{m}$ . Cuando una partícula pasa a través del orificio del sensor, su volumen suple al que ocuparía el fluido y causa un cambio temporal en la resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia es proporcional al volumen. En la Figura 4.5 podemos ver una fotografía del Coulter Multisizer.



*Figura 4.5: Coulter Multisizer II y aparato de lectura de datos.*

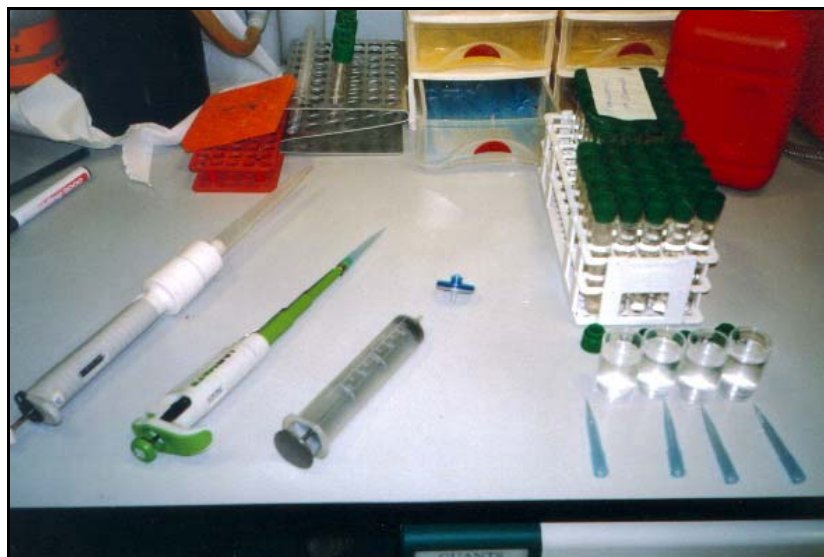
El modelo de Coulter utilizado permite detectar partículas de tamaños entre 0,7 y 21,48  $\mu\text{m}$ . Estos tamaños corresponden a partículas fundamentalmente de tipo supracoloidal (1  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ ). Es importante el hecho de que en los análisis no estemos contando las partículas disueltas y coloidales, puesto que esto será importante en la interpretación de los resultados. Una vez se ha hecho el conteo, se vuelcan los datos a un ordenador y se transforman en un archivo de Excel.

Para incrementar la conductividad de las muestras, y para que no se obture el orificio por donde pasan en el Coulter, lo que se analiza es una dilución de la muestra de 0,2 ml en 20 ml de isotón. El isotón es una solución salina que contiene una concentración de sales constante. Concretamente contiene:

- 7,9 g/l de cloruro de sodio
- 1,9 g/l de ortofosfato disódico
- 0,4 g/l de EDTA (sal disodio)
- 0,4 g/l de cloruro potásico
- 0,2 g/l de ortofosfato monosódico
- 0,3 g/l de fluoruro sódico

Antes de realizar la dilución, se filtra el isotón con un filtro de 0.22  $\mu\text{m}$ , para uniformizarlo y para que interfiera lo menos posible con el conteo de la muestra. También se realizan análisis del isotón (blancos), para saber cuál es la distribución de partículas que estamos añadiendo a la muestra.

La Figura 4.6 muestra los utensilios necesarios para la preparación de las muestras.

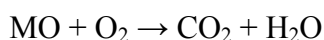


*Figura 4.6: Pipetas, filtros y dilución utilizados para el análisis de muestras.*

Se analiza cada dilución dos veces para comprobar que las lecturas son correctas. En caso de que ambas difieran de forma significativa, se realiza una tercera con el objetivo de detectar cual de las anteriores es la correcta. De este modo, para cada muestra tenemos siempre dos lecturas.

Una vez se tienen todos los datos en archivos Excel, se hace para cada muestreo una media de los blancos medidos. Después se hace la media de cada muestra y a ésta se le resta la media de los blancos. De este modo se tiene una lectura significativa de cuál es la distribución de partículas en cada muestra. Para la interpretación de los datos no hemos utilizado la distribución de partículas de cada tamaño, sino la función de distribución acumulada de partículas menores que un cierto tamaño, y la distribución de probabilidad acumulada.

Análogamente se ha efectuado el análisis del carbono orgánico total (TOC) de cada muestra. El TOC es una medida de la cantidad de materia orgánica presente. En este caso se ha usado el método normalizado que se basa en la combustión de la materia orgánica. Esta reacción se formula:

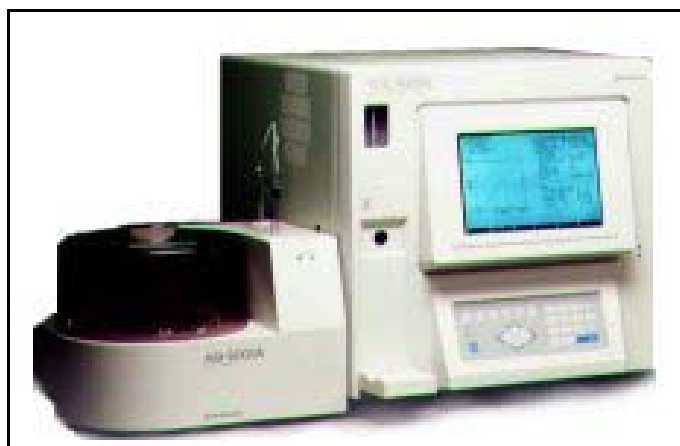


Para eliminar el carbono en forma inorgánica se añade ácido clorhídrico previamente. Los carbonatos se volatilizan así en forma de dióxido de carbono.





Cuando se realiza la combustión se detecta la cantidad de CO<sub>2</sub> liberada en la reacción, y de esta forma se determina la materia orgánica que contiene la muestra. El aparato utilizado en este caso ha sido un “Shimadzu TOC 5000 Analyzer”. Utiliza la técnica de combustión catalítica a 680°C combinada con detección infrarroja no dispersiva (NDIR). La Figura 4.7 muestra el detector de CO<sub>2</sub> utilizado.



*Figura 4.7: Detector de CO<sub>2</sub> para la determinación del TOC, “Shimadzu TOC 5000 Analyzer”.*

### 4.3. Modelización cinética

Se enumeran y describen a continuación los modelos a los que se han ajustado los datos obtenidos en cada campaña, y el modo de evaluación del ajuste de cada uno de ellos. La base teórica de estos modelos se encuentra explicada en el Capítulo 3 de este documento.

Los datos para la modelización variaron de una a otra campaña y humedal a causa de las diferentes dimensiones y cargas hidráulicas utilizadas. Estos datos se resumen en la Tabla 4.4:

*Tabla 4.4: Parámetros hidráulicos utilizados para la modelización cinética de las campañas de muestreo.*

|   | Humedal C2 |                 |        | Humedal D2 |           |
|---|------------|-----------------|--------|------------|-----------|
|   | Junio      | Julio/diciembre | Agosto | Junio      | Diciembre |
| HLR (mm/d)                              | 41         | 29              | 21     | 41         | 29        |
| Superficie (m <sup>2</sup> )            | 55         | 55              | 55     | 55,5       | 55,5      |
| Caudal (m <sup>3</sup> /d)              | 2,3        | 1,6             | 1,2    | 2,3        | 1,6       |
| A <sub>efectiva</sub> (m <sup>2</sup> ) | 1          | 1               | 1      | 0,5        | 0,5       |
| Velocidad (m/d)                         | 2,3        | 1,6             | 1,2    | 4,6        | 3,2       |
| D (m <sup>2</sup> /d)                   | 1,18       | 0,82            | 0,62   | 3,14       | 2,19      |
| t <sub>c</sub> (h)                      | 107        | 154             | 206    | 60         | 87        |

Los ajustes se han probado en primer lugar para las medias del número total de partículas en cada punto de muestreo para cada campaña. Con el objetivo de evaluar si el tamaño de las partículas influye en el modo de eliminación de las mismas, se ha procedido después al ajuste de los mismos modelos según el rango de tamaños.

La primera división de rangos que se probó fue escogida aleatoriamente. Los diámetros de partículas se separaron en aquellos entre 0,7 y 1  $\mu\text{m}$ , entre 1 y 2  $\mu\text{m}$ , entre 2 y 3  $\mu\text{m}$ , entre 3 y 4  $\mu\text{m}$ , y mayores a 4  $\mu\text{m}$ . A la vista de los resultados y por motivos que se exponen en el Capítulo 5, se procedió a ajustar los modelos a rangos de partículas inferiores a 1  $\mu\text{m}$ , rangos que corresponden a partículas de tipo coloidal. Los rangos escogidos fueron de 0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$ , de 0,8 a 0,9  $\mu\text{m}$  y de 0,9 a 1  $\mu\text{m}$ .

Se han seguido dos métodos para la evaluación del ajuste de los modelos hidráulicos. En el primer método se deducen las constantes de cada modelo a partir de los datos de entrada y salida obtenidos en los muestreos. Estos datos usados como condiciones de contorno definen una constante de eliminación de partículas en cada caso, a partir de la cual se desarrolla el modelo analítico. Para determinar el nivel de ajuste de los datos reales a dicho modelo, se determina el error cuadrático de éste con respecto de los datos empíricos. Este valor es el que tomamos como indicador de la bondad de cada modelo.

En el segundo método de ajuste se ha determinado cuáles son las constantes de eliminación de partículas que definen un desarrollo analítico de cada modelo tal que minimiza el error cuadrático anteriormente descrito. De este modo podemos afirmar que si los valores de las constantes que cumplen esta condición en los diferentes muestreos son similares, hemos obtenido modelo fiable para la eliminación de partículas en los humedales.

El primer modelo que se ha utilizado es el modelo de flujo en pistón (PF: *Plug Flow*). Su formulación es la que muestra la Ecuación 5.1:

$$\frac{C(t)}{C_0} = -\exp(k \cdot t) \quad (5.1)$$

donde

$C(t) \equiv$  Concentración de partículas en el instante  $t$ , n° de partículas

$C_0 \equiv$  Concentración de partículas a la entrada del humedal, n° de partículas

$k \equiv$  Constante de eliminación de partículas,  $t^{-1}$

$t \equiv$  Tiempo de permanencia del agua en el humedal, h

En segundo lugar se ajustan los datos reales al modelo de flujo en pistón con retardo (RPF):

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp\left(-\frac{k}{R} \cdot \ln(1 + R \cdot t)\right) \quad (5.2)$$

Como puede observarse en este modelo intervienen dos constantes diferentes, la constante de eliminación de las partículas ( $k$ ) y el coeficiente de retardo basado en el tiempo ( $R$ ). En la literatura existente se determina esta última constante para los

humedales como un valor comprendido entre 2 y 5 (*H.L. Shepherd, 2001*). Sin embargo, al no haber mucha información al respecto, se ha optado por iterar con ambas constantes para determinar qué combinación de éstas era la que daba un mejor ajuste. Se ha optado por buscar la  $k$  que permitía obtener la concentración de partículas empírica a la salida de los humedales, y una vez obtenida ésta, iterar  $R$  hasta obtener el valor que permite un mejor ajuste.

El tercer modelo es el modelo de flujo en pistón con dispersión, cuya formulación es:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \frac{4 \cdot b \cdot \exp\left(\frac{P_e}{2}\right)}{(1 + b^2) \cdot \exp\left(\frac{b \cdot P_e}{2}\right) - (1 - b^2) \cdot \exp\left(\frac{-b \cdot P_e}{2}\right)} \quad (5.3)$$

La constante de eliminación  $K$  en esta ecuación se encuentra de modo implícito, tal y como se explicó en el Capítulo 3, ya que:

$$b = \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{D_a}{P_e}} \quad \text{con} \quad D_a = K \cdot t$$

$$P_e = \frac{u \cdot L}{D}$$

Por último se prueba un ajuste a un modelo de tanques en serie con un tanque de flujo en pistón (CST). La ecuación que rige este modelo se divide en dos partes que dependen del tiempo de concentración que tenga el tanque de flujo en pistón teórico ( $T_d$ ) que se le asigne al modelo. Para el tramo del humedal cuyo tiempo de llegada del agua es menor a dicho  $T_d$ , la ecuación que rige la eliminación de partículas es la del reactor de flujo en pistón (Ecuación 5.1). Para el tramo posterior, correspondiente a la eliminación producida por  $n$  tanques de mezcla completa en serie, la formulación es:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \frac{1}{\left[1 + \frac{D_a \cdot (1 - T_d)}{n \cdot T_c}\right]^n} \quad (5.4)$$

Los valores de  $T_d$  y del número de tanques en serie óptimos para modelizar el comportamiento de los humedales se determinaron con anterioridad en ensayos realizados en los mismos humedales con que se trabaja en esta tesina. Se determinó que en los humedales C2 los valores óptimos fueron  $T_d = 99$  horas y  $n = 3$  tanques de mezcla completa, y para los humedales D2, 50 horas y 4 tanques respectivamente (*Chiva, 2002; García et al., 2004*).

Con el objetivo de determinar y comparar entre la validez de las constantes deducidas en cada uno de los modelos, se calcula la varianza de cada una de ellas como medida de la dispersión de los datos obtenidos. Calculamos la varianza como:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 \quad (5.5)$$

donde

$S^2 \equiv$  varianza

$N \equiv$  número de datos

$x_i \equiv$  valor  $i$

$a \equiv$  media de los datos