

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las campañas de los meses de junio, julio, agosto y diciembre en los humedales C2 y D2 de la planta de Les Franqueses del Vallès. Asimismo se presentan las conclusiones que se desprenden de dichos resultados.

La cantidad de muestra analizada en cada caso ha sido de 100 µl de una disolución de 0.2/20 ml. Por lo tanto, en lo que respecta al conteo de partículas, los datos reales, referidos a concentraciones por ml de muestra, son 10⁶ veces mayores de lo reflejados en los análisis.

Para cada una de las muestras se han realizado observaciones referentes a la distribución acumulada de partículas, la distribución por rangos de tamaño y la disminución en tanto por uno de la cantidad de partículas en comparación a la disminución del TOC.

Por último se ha comprobado el ajuste de cuatro modelos hidráulicos para las medias de los datos obtenidos en los diferentes puntos de muestreo para cada campaña. Estos modelos son: flujo en pistón, flujo en pistón con retardo, flujo en pistón con dispersión y un modelo basado en tanques en serie con un tanque de flujo en pistón antes de la entrada.

Dada la gran cantidad de datos y gráficas generadas, en el presente capítulo se muestran solamente los necesarios a fin de ilustrar las explicaciones, y aquellos que tienen características diferenciadas al resto. Se adjunta también un CD que contiene todos los archivos de datos generados por el Coulter Moulisizer, a partir de los cuales se han obtenido los resultados del presente capítulo. En el Anejo 1 se muestra a modo de ejemplo uno de estos archivos de datos. En el CD se incluyen también los archivos que contienen las gráficas, para que puedan consultarse los cálculos en caso de que fuera necesario.

5.1 Conteo de partículas

5.1.1 Primera campaña

La primera campaña de muestreo se realizó en junio de 2003 y duró cinco días. Se disponen por lo tanto datos de los dos humedales estudiados, correspondientes a cinco días y a distintos puntos de muestro para cada uno de ellos.

5.1.1.1. Humedal C2

En primer lugar se ha representado la distribución acumulada de partículas para cada punto de muestreo del humedal, y para cada uno de los días de duración de la primera campaña. Se muestran a continuación los resultados correspondientes al lunes.

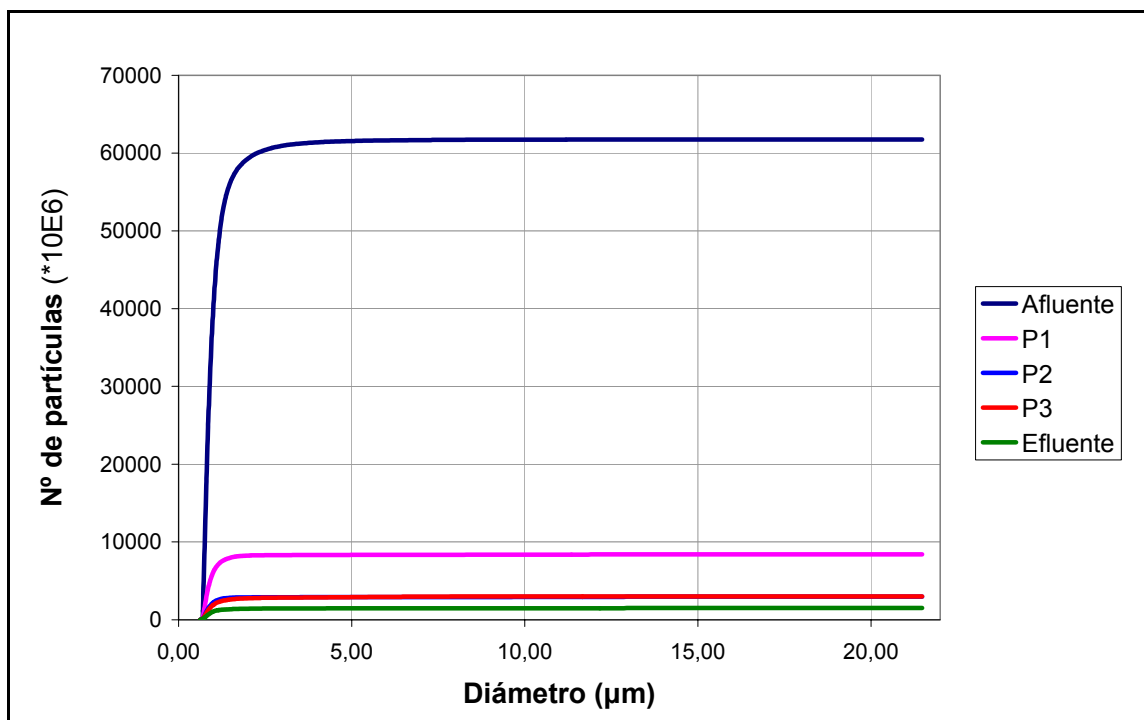


Figura 5.1: Distribución acumulada de partículas en los distintos puntos de muestreo del humedal C2, correspondiente al lunes de la campaña de junio.

La Figura 5.1, permite ver varios fenómenos. El primero y más evidente es que en la primera fracción del humedal, correspondiente al tramo entre el punto de afluencia del agua y el primer punto de toma de muestras, se produce la mayor parte de la eliminación de partículas. Del primer piezómetro en adelante, se produce también una disminución de la cantidad total de partículas, aunque ésta es mucho menos significativa.

En segundo lugar vemos que el aumento más significativo del número acumulado de partículas para todos los puntos de muestreo se produce al inicio de la gráfica, en la zona correspondiente a los menores tamaños. El diámetro de partículas predominante tiene entre 0,7 y 2 µm (0,7 µm es el tamaño mínimo que detecta el contador de partículas utilizado). Estos tamaños corresponden a partículas de tipo coloidal (0,001 - 1 µm) y al primer tramo de la clasificación supracoloidal (1 - 100 µm). Puede observarse que a partir de los diámetros mayores a 2,5 µm la cantidad acumulada apenas experimenta crecimiento.

En la Tabla 5.1 se muestran los valores del TOC obtenidos para el lunes de la primera campaña y para cada uno de los puntos de muestreo.

Tabla 5.1: Concentración de TOC según punto de muestreo del humedal C2, correspondiente al lunes de la campaña de junio

	Afluyente	P1	P2	P3	Efluyente
TOC (mgC/ml)	38	25	21	19	21

La Figura 5.2 muestra el tanto por uno de eliminación del total de partículas a lo largo del humedal en relación a la eliminación de TOC.

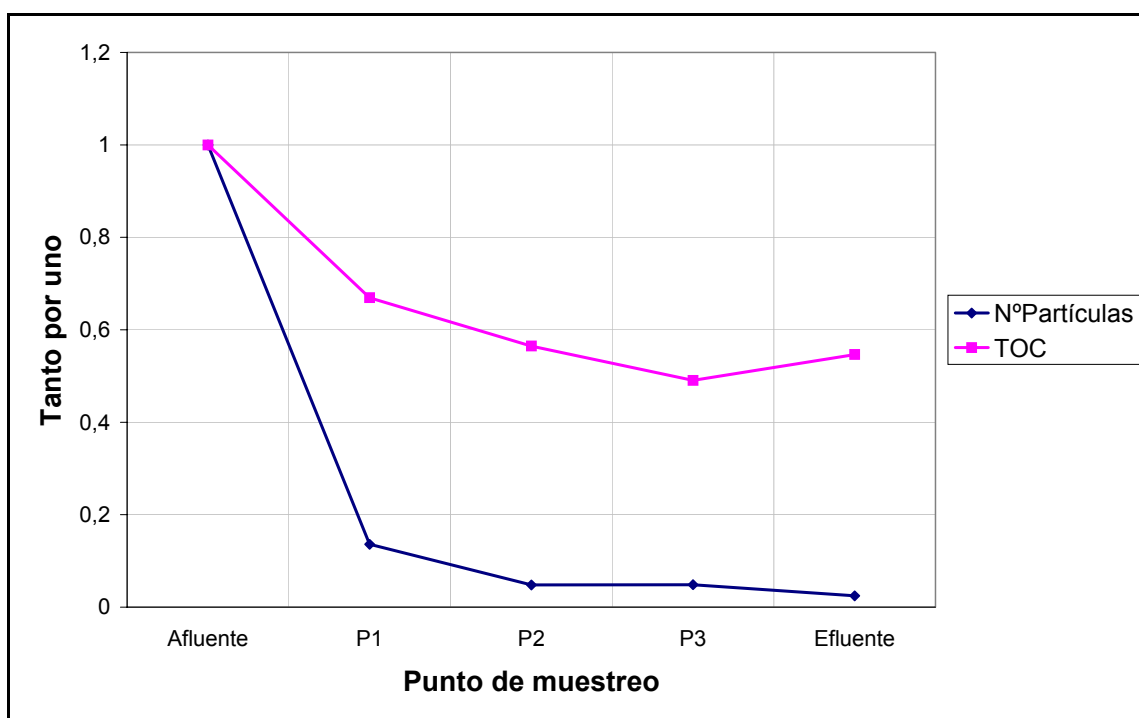


Figura 5.2 Eliminación del número total de partículas y el TOC a lo largo del humedal C2, correspondiente al lunes de la campaña de junio.

En la Figura 5.2 se aprecia que, del mismo modo que lo hacen las partículas, el TOC sufre su mayor decaimiento en el primer tramo del humedal. La tendencia de ambas es similar, si bien el porcentaje remanente de TOC después del punto de muestreo correspondiente al piezómetro 1 (P1), es significativamente mayor que el de número de partículas. Por este motivo no podemos establecer una relación directa entre ambos parámetros.

Con el objetivo de ver cuáles son los tipos de partículas que más porcentaje de reducción sufren, se ha realizado para cada día de muestreo un histograma según los rangos de tamaños de partículas. El resultado obtenido es el mostrado en la Figura 5.3.

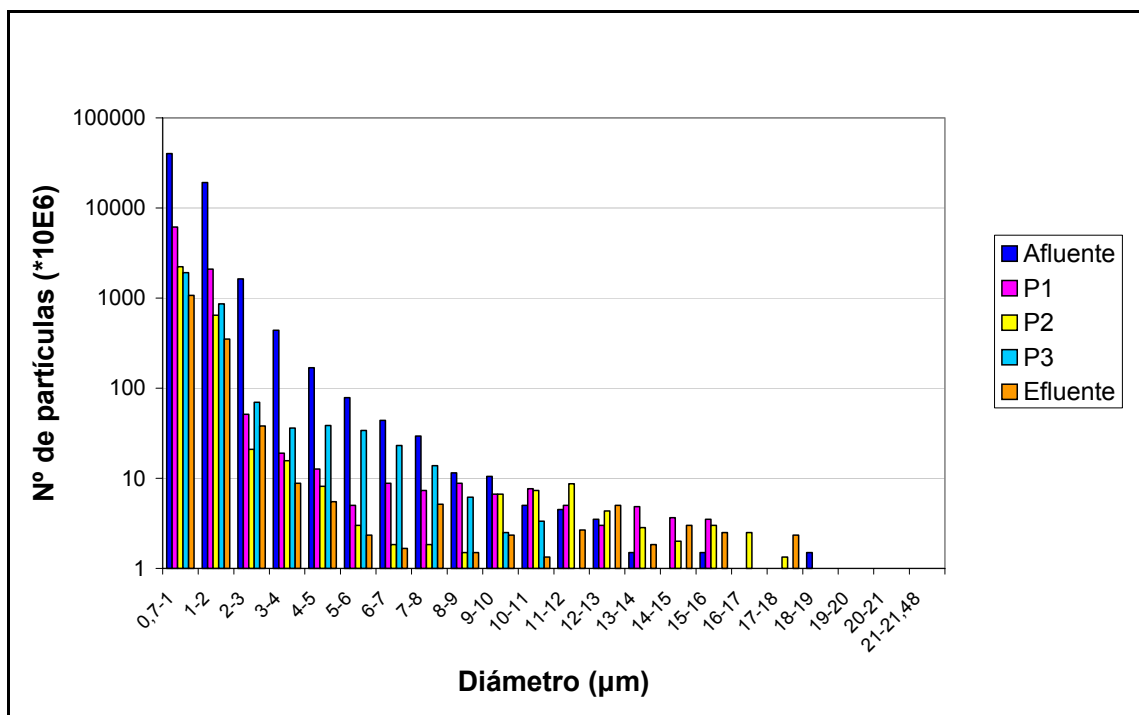


Figura 5.3: Evolución del número de partículas según rangos de diámetros a lo largo del humedal C2, correspondiente al lunes de la campaña de junio.

Podemos apreciar como la mayor parte de las partículas entrantes en el humedal corresponden a tamaños comprendidos entre 0,7 y 2 µm. Se puede observar como los rangos de partículas mayores sufren una eliminación casi absoluta, mientras que las partículas de este tamaño, aunque no se eliminan totalmente, sufren una disminución de dos órdenes de magnitud (nótese que la escala del eje Y es logarítmica). A la vista de este gráfico puede concluirse que el grueso de las partículas remanentes a la salida del humedal está formada en una gran mayoría por partículas de tamaños entre 0,7 y 2 µm, y presumiblemente por otras de diámetros menores, aunque éstas son a su vez las que experimentan un decaimiento más importante. Estos fenómenos se observan más claramente si comparamos tan solo el afluente y el efluente, como muestra la Figura 5.4.

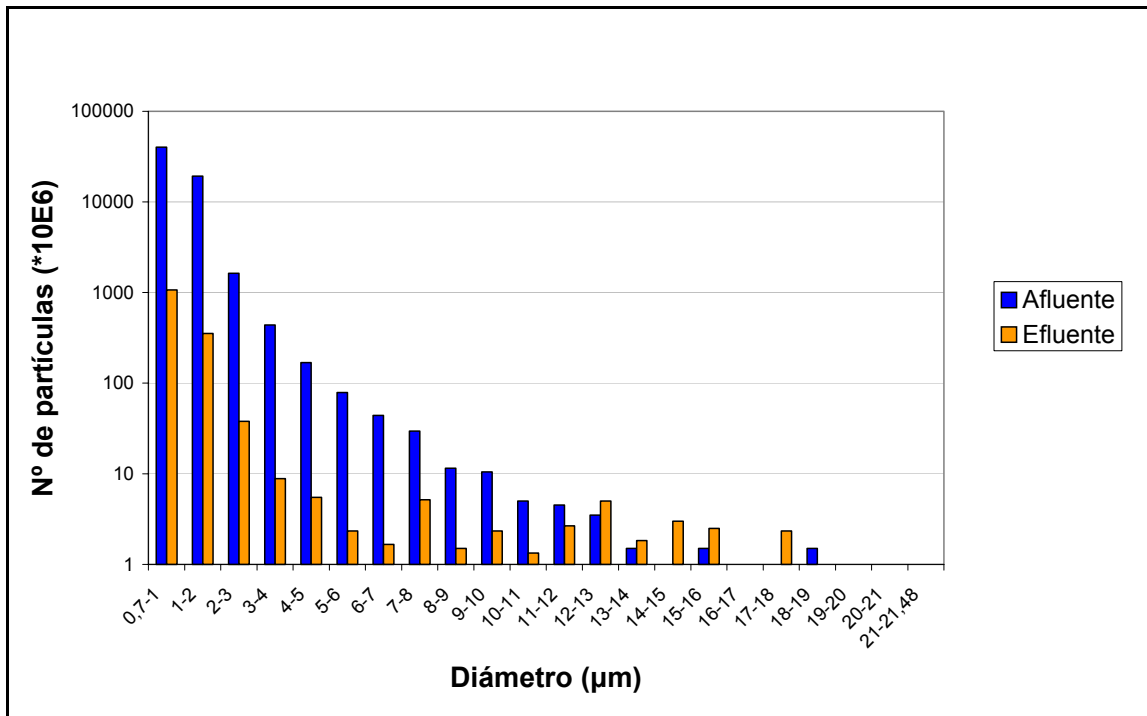


Figura 5.4: Número de partículas según rangos de diámetros contenidas en el afluente y el efluente del humedal C2, correspondiente al lunes de la campaña de junio.

En los siguientes días de muestreo se han obtenido unos resultados muy similares. Con el objetivo de ilustrar esta similitud de resultados, se presentan a continuación los gráficos correspondientes al martes. En primer lugar, se muestra en la Figura 5.5 la distribución acumulada de partículas según tamaños en función del punto de muestreo.

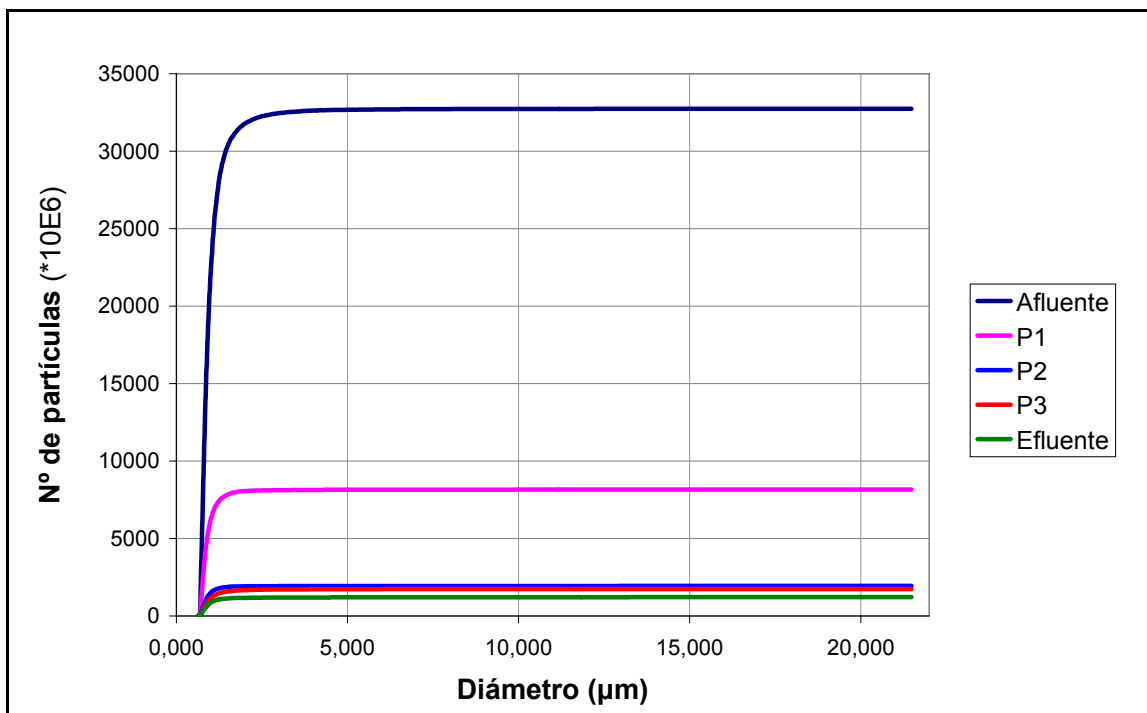


Figura 5.5: Distribución acumulada de partículas en los distintos puntos de muestreo del humedal C2 correspondiente al martes de la campaña de junio.

Se observa que las tendencias son las mismas que para los resultados del lunes. La mayor parte de las partículas corresponden a diámetros menores a 2 μm , y existe también una disminución muy importante en número en el primer cuarto de humedal.

Los datos del TOC son en este caso los mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Concentración de TOC según punto de muestreo del humedal C2, correspondiente al martes de la campaña de junio.

	Afluente	P1	P2	P3	Efluente
TOC (mgC/ml)	43	14	16	13	14

Con estos datos, la tendencia de eliminación de TOC y de partículas es la que ilustra la Figura 5.6.

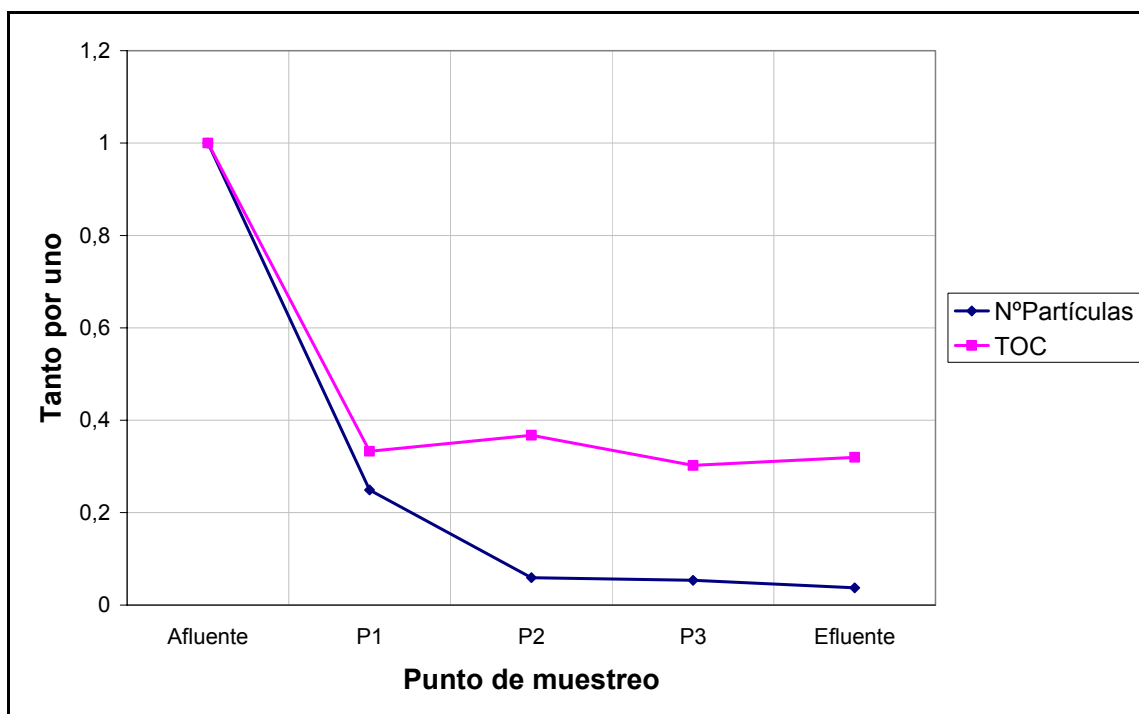


Figura 5.6: Eliminación del número total de partículas y el TOC a lo largo del humedal C2, correspondiente al martes de la campaña de junio.

La tendencia de esta gráfica es la misma que la correspondiente al primer día de muestreo de la primera campaña. Se observa que tanto en lo referente al número total de partículas como en lo que se refiere al TOC, la disminución más importante de partículas se da en el primer tramo del humedal, aunque esta disminución es mucho más significativa cuando se refiere al número de partículas. A partir del primer piezómetro la tendencia de ambas gráficas es casi horizontal.

Como se aprecia en la Figura 5.7, en lo que se refiere a la eliminación de partículas en función de los rangos de tamaños, en este caso es incluso más evidente que las partículas de más de 2 μm se eliminan casi de forma absoluta a lo largo del humedal.

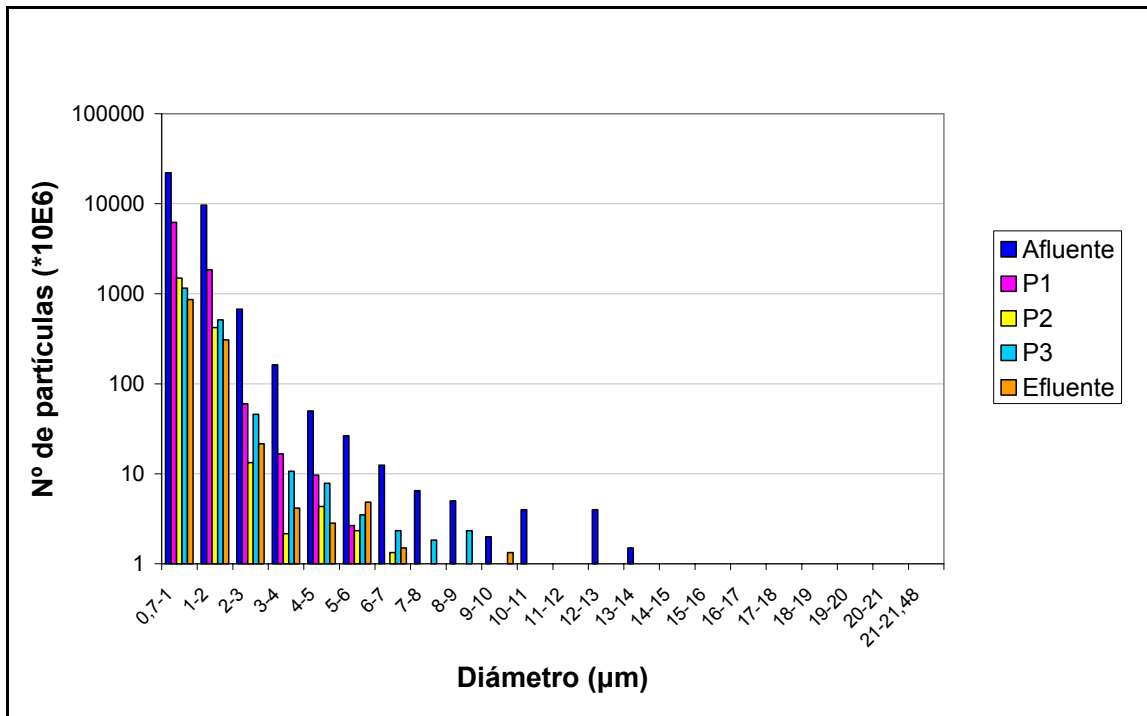


Figura 5.7: Evolución del número de partículas según rangos de diámetros a lo largo del humedal C2, correspondiente al martes de la campaña de junio,

Para el resto de días de la primera campaña, los resultados son muy similares. Pueden verse las gráficas correspondientes al miércoles, jueves y viernes en el Anejo 2.1.

La Figura 5.8 muestra la eficiencia de eliminación del número total de partículas en el humedal según día de muestreo. Podemos ver como ésta es muy similar todos los días.

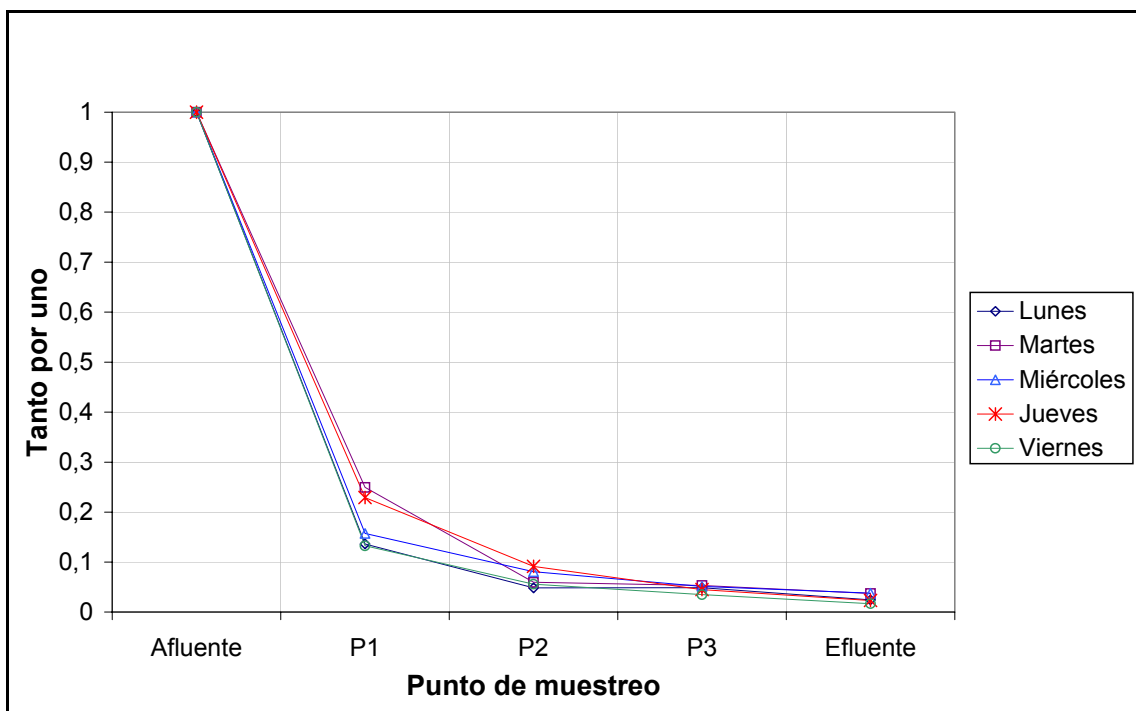


Figura 5.8: Eliminación por días del número total de partículas a lo largo del humedal C2, correspondiente a la campaña de junio de muestreo.

En el primer tramo del humedal se consiguió para todos los días una eliminación de entre el 70 y el 90 % del total de partículas entrantes. A partir del segundo piezómetro el número de partículas remanente en todos los casos es inferior al 10 % inicial, siendo a la salida de aproximadamente el 5%.

Para poder comparar la eliminación de MO con la eliminación de partículas en el humedal, haremos una representación del mismo tipo para el TOC. Las medidas que se han obtenido en la primera campaña para el humedal C2 son los contenidos en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Concentración de TOC según punto de muestreo del humedal C2, correspondiente a la campaña de junio.

TOC (mgC/ml)	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Afluente	38	43	40	39	52
P1	25	14	18	18	36
P2	21	16	18	29	32
P3	19	13	13	17	28
Efluente	21	14	14	15	19

La Figura 5.9 muestra la evolución del TOC en tanto por uno a lo largo del humedal.

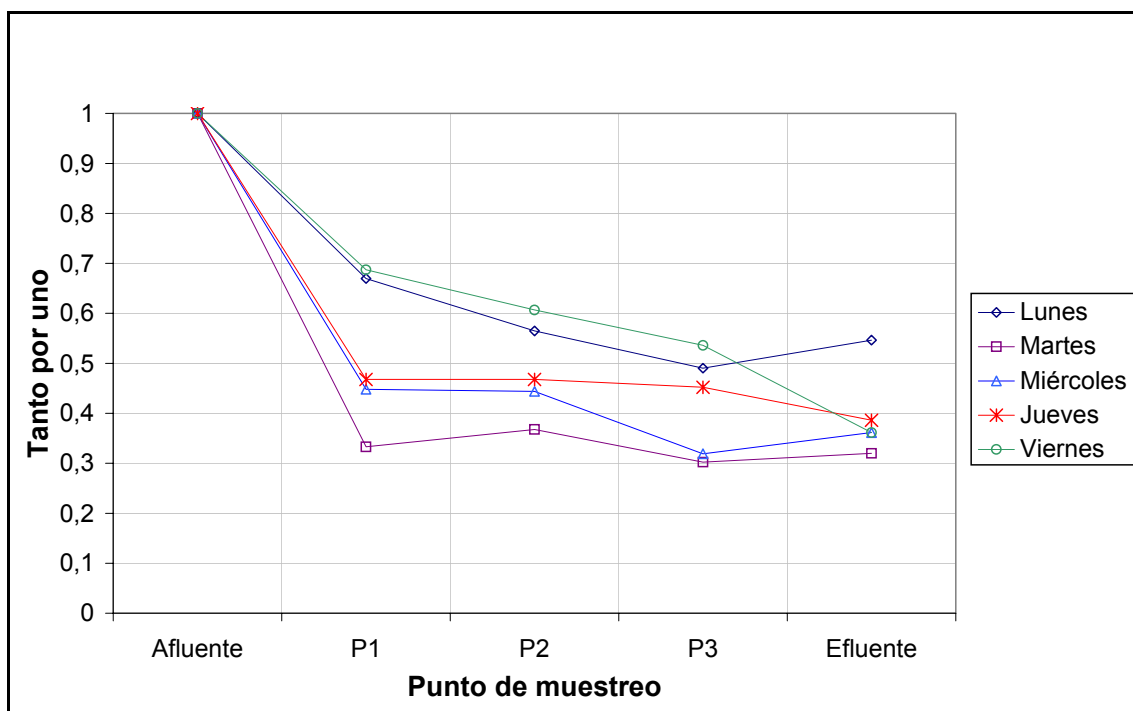


Figura 5.9: Eliminación según días del TOC a lo largo del humedal C2, correspondiente a la campaña de junio.

En el primer tramo se produce también gran parte de la eliminación de TOC, pero no es tan significativo como en el caso del número de partículas. De todos modos, la cantidad de materia orgánica eliminada a lo largo del humedal es en el peor de los casos el 50% de la entrante.

5.1.1.2. Humedal D2

El motivo por el que se ha escogido analizar las muestras de los humedales C2 y D2, como se explicó en el Capítulo 3, es el hecho de que tienen dimensiones diferentes. El humedal C2 tiene una relación ancho/largo de 2/1, mientras que el D2 la tiene de 2,5/1. De este modo, el humedal D2 se asemeja más a un reactor de flujo en pistón que el humedal C2, por lo que podrían esperar rendimientos mejores, o al menos distintos. Además, la profundidad media del humedal C2 es de 0,51 m., mientras que la del D2 es de 0,27 m., por lo que la cantidad de oxígeno disuelto en la columna de agua del humedal D2 es mayor que el del C2 (Chico, 2002). Esta diferencia en el contenido de oxígeno puede provocar que los mecanismos de eliminación de la MO sean distintos en uno y otro humedal.

Sin embargo, como se observará a continuación, los resultados obtenidos en el humedal D2 no han diferido significativamente de los obtenidos en el C2. Cualitativamente, las conclusiones que se desprenden de ellos son las mismas que las obtenidas en el apartado anterior.

La muestra correspondiente al punto de muestreo P1 del humedal D2 del jueves de la primera campaña se perdió antes de poder realizar el conteo de partículas, aunque pudieron realizarse las pruebas correspondientes al TOC. Por este motivo, los datos que se han necesitado a la hora de representar se han extrapolado de los resultados existentes, o se han aproximado según la tendencia de los datos del mismo día.

A modo de ejemplo se presentan los resultados correspondientes al martes de la primera campaña, por presentar estos alguna pequeña diferencia con los obtenidos en el humedal C2. La distribución acumulada de partículas según tamaños obtenida es la que se muestra en la Figura 5.10.

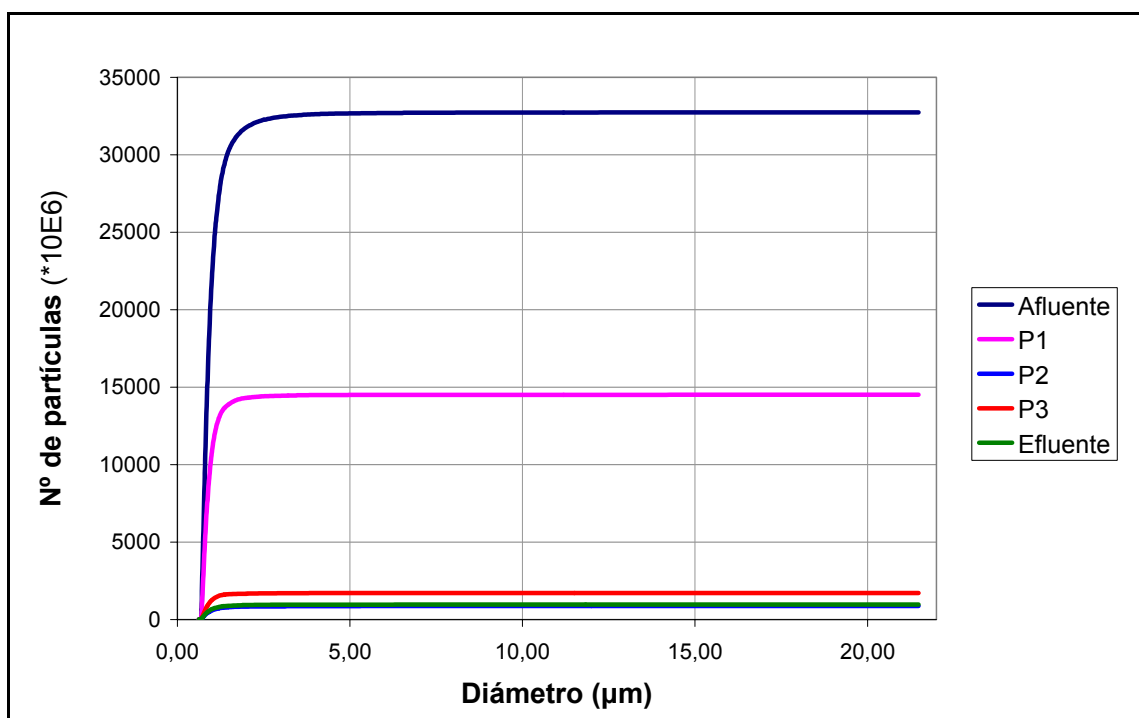


Figura 5.10 Distribución acumulada de partículas en los distintos puntos de muestreo del humedal D2, correspondiente al martes de la campaña de junio.

Al igual que en el humedal C2 puede verse una disminución del número total de partículas en el tramo de humedal que va desde la entrada de agua hasta el primer piezómetro. Asimismo se observa que en todos los puntos de muestreo, la fracción de partículas más abundante es la correspondiente a diámetros entre 0,7 y 2 μm .

Aunque cualitativamente el resultado es similar al obtenido en el C2, sí se detecta alguna diferencia. En algunos de los días de muestreo, como es el caso del que nos ocupa, se aprecia que el orden descendente en el número de partículas totales a medida que se avanza en el humedal, que se daba sin excepción en el anterior caso, no se cumple aquí de forma estricta para los puntos de muestreo P2, P3 y efluente. Al igual que ocurre en este caso, las muestras tomadas en miércoles y viernes reflejan en algunos puntos de muestreo mayor número de partículas que en otros puntos anteriores. Sin embargo estas diferencias siempre son pequeñas y no se dan por erróneas al no conocerse en detalle cómo son los procesos de degradación de la materia en el interior del humedal.

También puede observarse en las gráficas correspondientes al lunes y al martes que la disminución del número total de partículas entre el afluente y el punto de muestreo P1, aún siendo mayor al 50 %, no es tan significativa como en el resto de casos.

En cuanto a la comparación entre la disminución del TOC y el número total de partículas, se mantiene la similitud entre los resultados en el humedal C2 y el D2, como puede verse en la Figura 5.11.

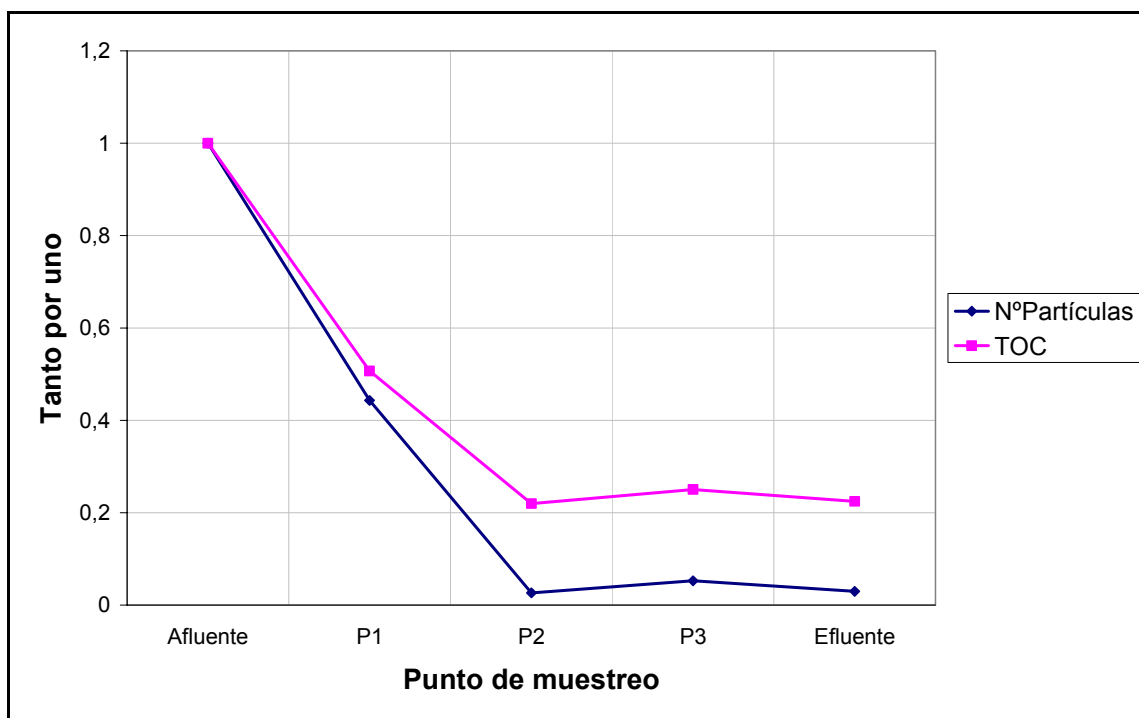


Figura 5.11: Eliminación del número total de partículas y el TOC a lo largo del humedal D2, correspondiente al martes de la campaña de junio.

La tendencia es siempre un gran descenso de ambas propiedades entre el punto de afluencia y el piezómetro número 1, y una estabilización posterior, siendo siempre mayor el descenso del tanto por uno del número total de partículas que el del TOC.

En lo que respecta a la clasificación según rangos de diámetros de partículas, el comportamiento es también el mismo, como se muestra en la figura 5.12, correspondiente al histograma del martes.

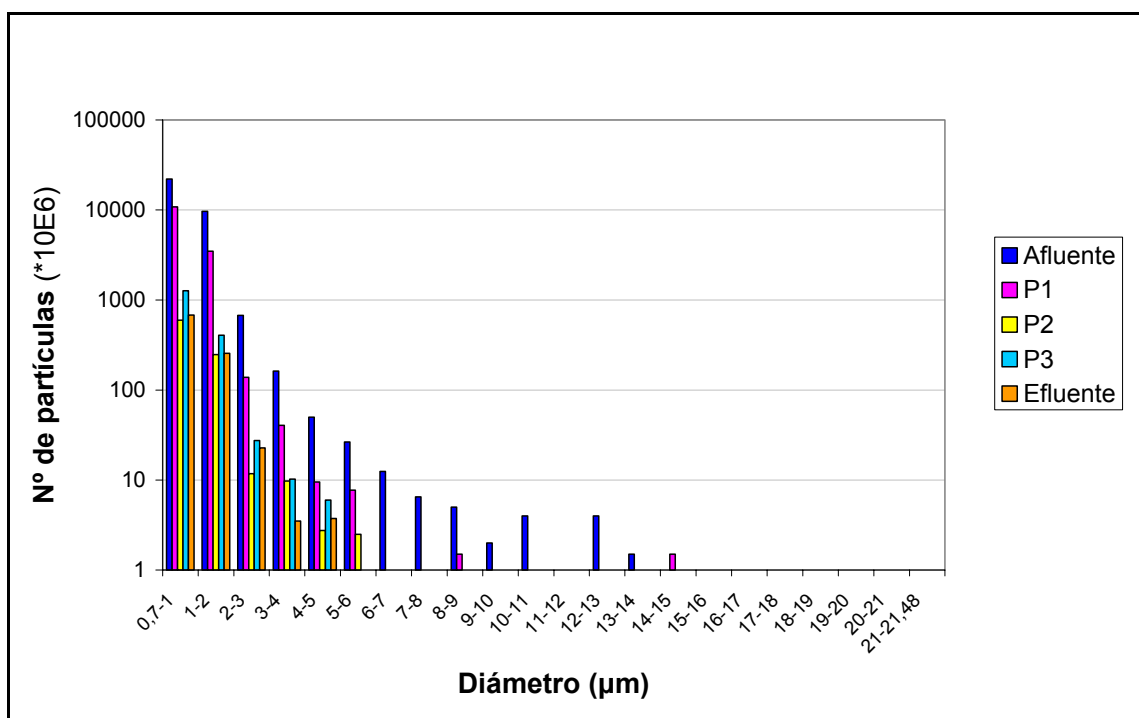


Figura 5.12: Evolución del número de partículas según rangos de diámetros a lo largo del humedal D2, correspondiente al martes de la campaña de junio.

Las partículas de entre 0,7 y 2 μm sufren una disminución en número de dos órdenes de magnitud, y las mayores son prácticamente inexistentes a la salida del humedal.

El resto de gráficas y resultados correspondientes a los demás días del primer muestreo se adjuntan en el Anejo 2.1.

En este caso la comparación de la eliminación del número total de partículas en el humedal según el día de muestreo, nos da el siguiente gráfico que muestra la Figura 5.13

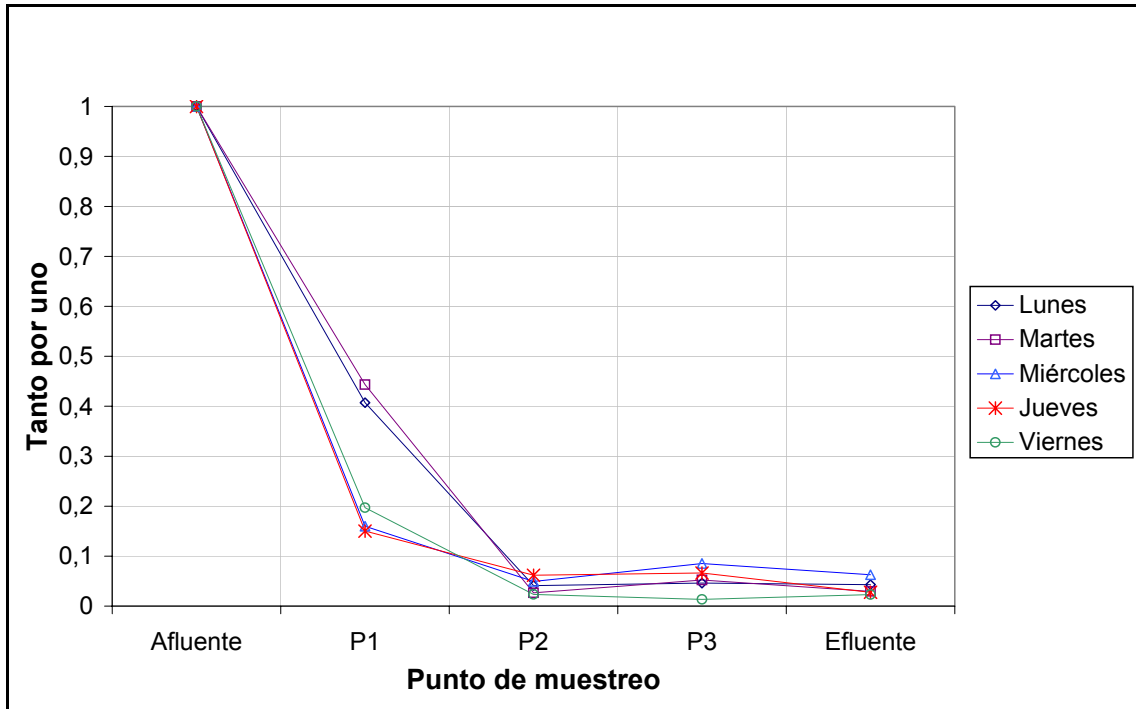


Figura 5.13: Eliminación por días del número total por de partículas a lo largo del humedal D2 correspondiente a la campaña de junio.

Se aprecia como los días en que el número de partículas no desciende de forma tan pronunciada en el primer tramo del humedal (lunes y martes), a la salida del humedal se consigue a pesar de ello, un porcentaje de eliminación similar al del resto de días. Este porcentaje es a su vez muy parecido al obtenido para el humedal C2, de alrededor del 95 % en todos los días.

Los datos del TOC en este caso se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Concentración de TOC según punto de muestreo del humedal D2, correspondiente a la campaña de junio.

TOC (mgC/ml)	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Afluente	38	43	40	39	52
P1	25	14	18	18	36
P2	21	16	18	29	32
P3	19	13	13	17	28
Efluente	21	14	14	15	19

La representación de estos datos en tanto por uno nos proporciona el siguiente gráfico de la Figura 5.14.

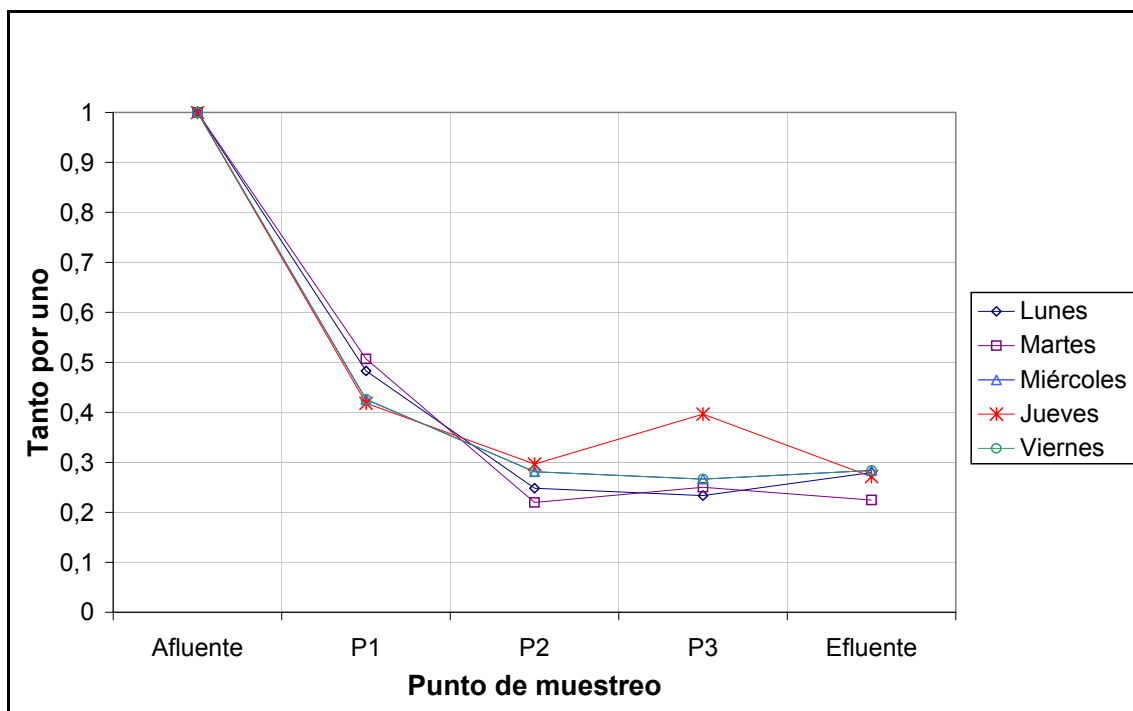


Figura 5.14: Eliminación según días del TOC a lo largo del humedal D2, correspondiente a la campaña de junio.

Una comparación a vista entre las Figuras 5.13 y 5.14 nos permite ver como aún siendo la tendencia la misma, sigue existiendo también en este muestreo una diferencia entre el porcentaje de eliminación de partículas y de TOC que no nos permite establecer una relación directa entre ambas. Si la comparamos con la eliminación de TOC en el humedal C2, se aprecia que aquí esta eliminación es sensiblemente superior.

5.1.2. Segunda campaña

La segunda campaña se llevó a cabo en el mes de julio de 2003, también con una duración de cinco días. Los muestreos y análisis se llevaron a cabo de forma similar al de la primera campaña con el fin de que los resultados fueran comparables.

5.1.2.1. Humedal C2

En lo que respecta al humedal C2, esta campaña no muestra diferencias destacables en comparación a la primera. De los gráficos de distribución acumulada de tamaños de partículas, las comparativas de disminución de número total de partículas y TOC, y los histogramas según rangos de tamaños, se desprenden las mismas conclusiones que se han resaltado con anterioridad. Estos gráficos se incluyen en el CD adjunto.

Con el objetivo de ilustrar la similitud con los resultados anteriores, se adjuntan a continuación las Figuras 5.15 y 5.16 que muestran las gráficas de eliminación de número total de partículas y de TOC.

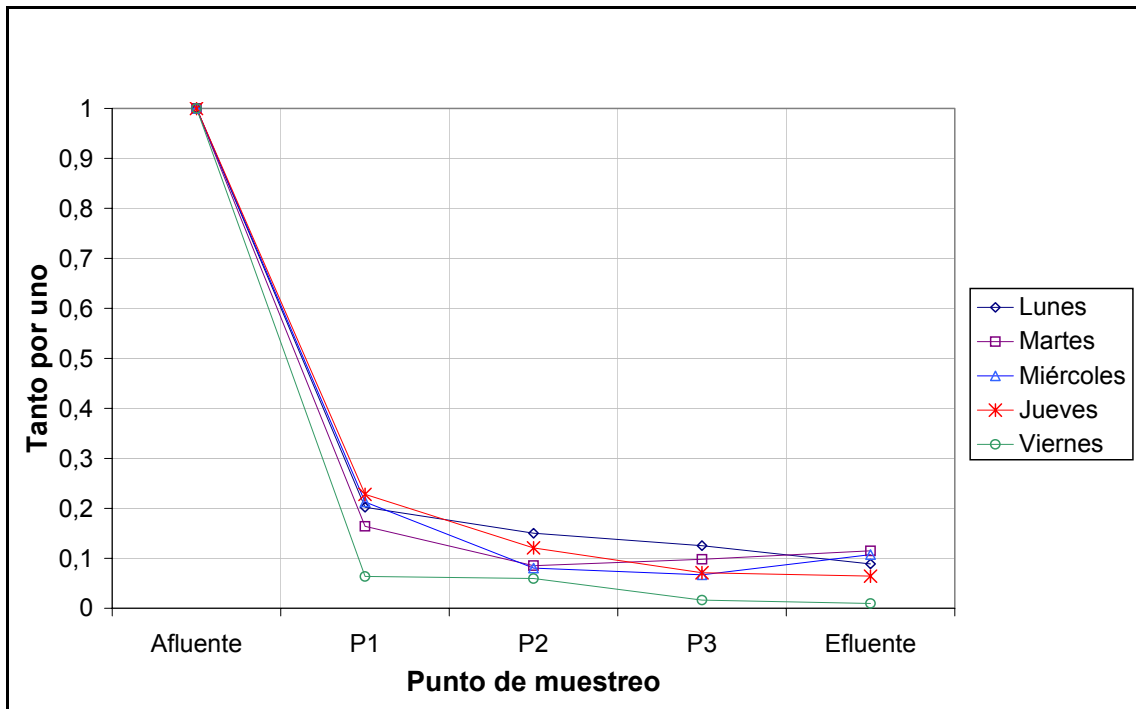


Figura 5.15: Eliminación por días del número total por de partículas a lo largo del humedal C2 correspondiente a la campaña de julio.

En el peor de los casos, la eliminación de partículas en el primer tramo de humedal es mayor al 75 %, y a la salida del mismo, la cantidad de partículas remanente es siempre inferior al 15 %.

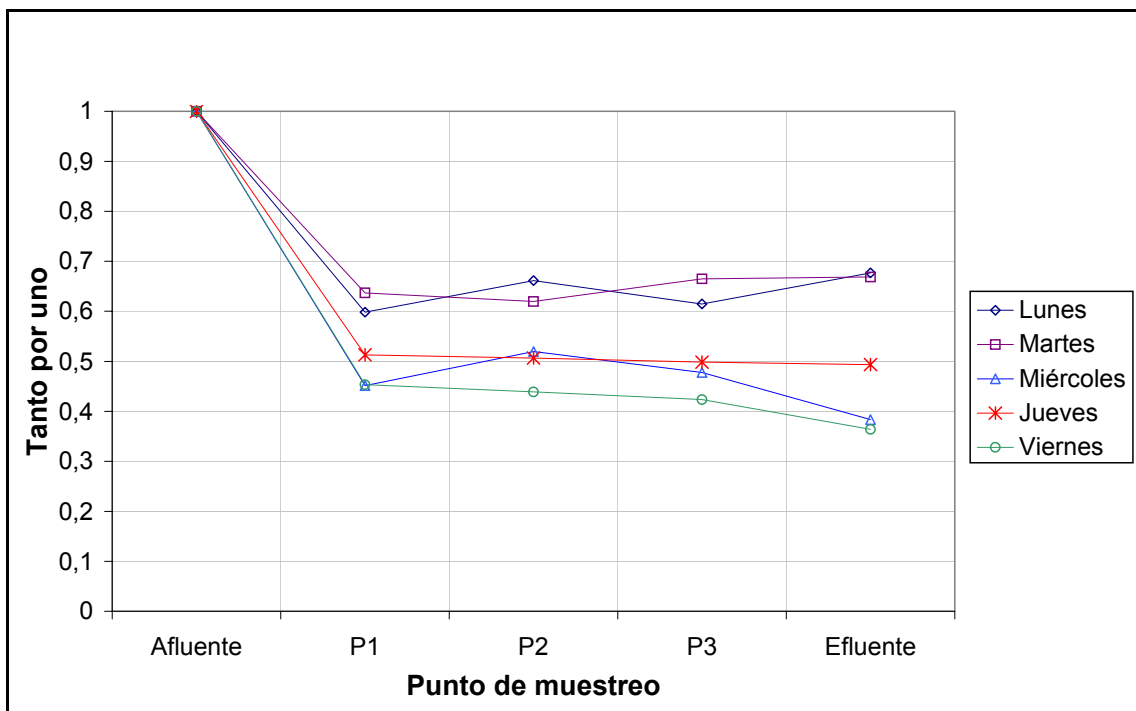


Figura 5.16: Eliminación por días del TOC a lo largo del humedal C2 correspondiente a la campaña de julio.

Se repite también el comportamiento del TOC, con una disminución importante en el primer tramo, pero sin llegar a las cotas de la eliminación de partículas. A la salida, el tanto por uno de eliminación es del orden de los obtenidos en la primera campaña en el humedal C2.

5.1.2.2. Humedal D2

En este caso, los resultados obtenidos en cuanto al conteo de partículas no han sido los esperados. En ninguno de los días de muestreo las gráficas siguieron las tendencias que se habían obtenido hasta el momento. Como ejemplo, se muestran los resultados correspondientes al lunes.

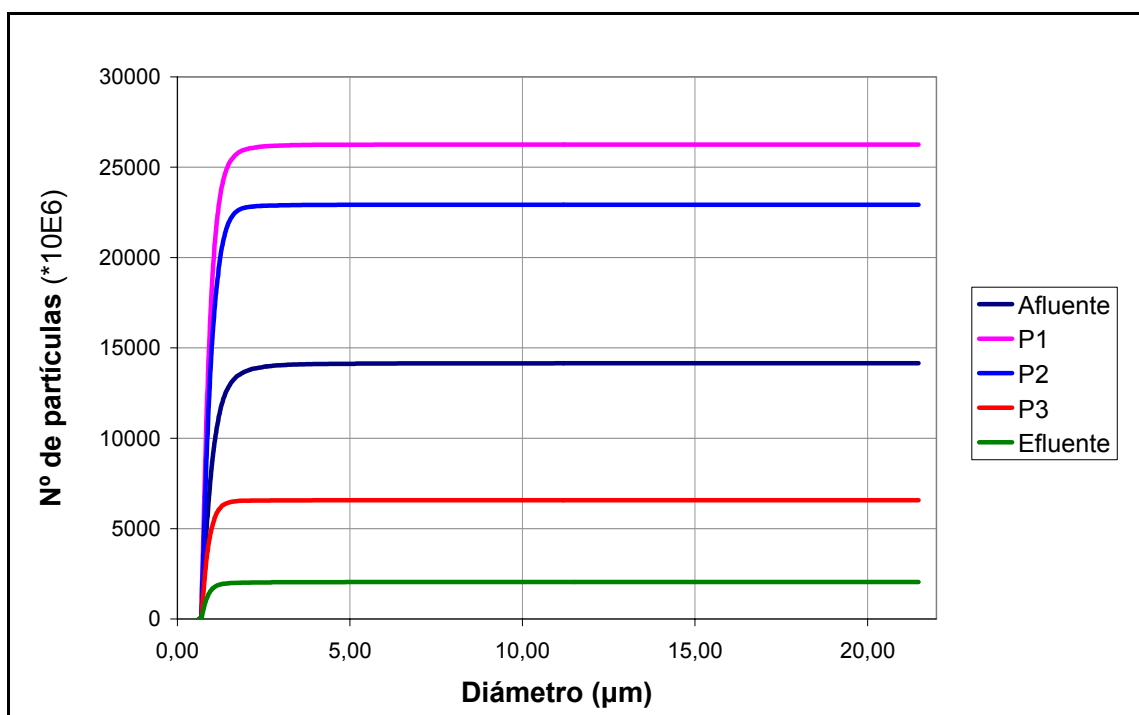


Figura 5.17: Distribución acumulada de partículas en los distintos puntos de muestreo del humedal D2 correspondiente al lunes de la campaña de julio.

Se puede ver en la Figura 5.17 que aunque la fracción más importante en número sigue siendo la correspondiente a $0,7 - 2 \mu\text{m}$, no existe una correlación lógica entre el número total de partículas. Se desprendería de este gráfico que en mitad del humedal el número de partículas ha crecido para después descender en la salida. Esto podría tener alguna lógica si pensáramos que a la entrada existe gran número de partículas de gran diámetro que se degradan en partículas más pequeñas en la primera mitad del humedal. Pero como se aprecia en el histograma, esto no ocurre.

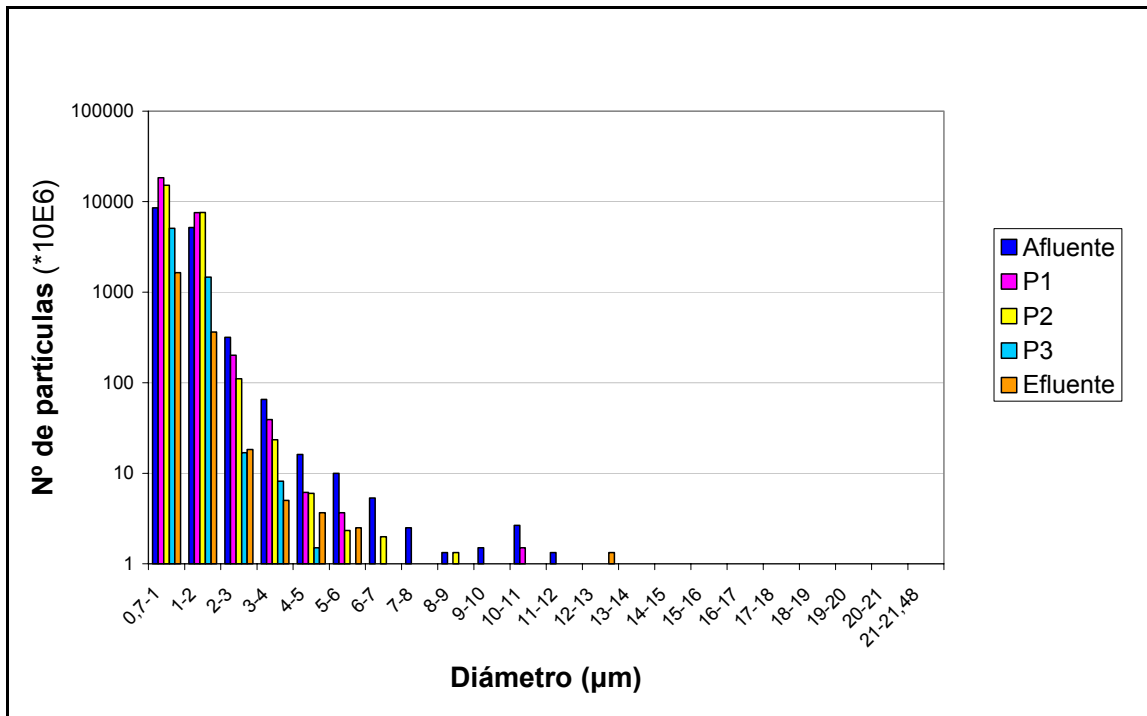


Figura 5.18: Evolución del número de partículas según rangos de diámetros a lo largo del humedal D2, correspondiente al lunes de la campaña de julio.

Como se aprecia en la Figura 5.18, el número de partículas de diámetro grande a la entrada del humedal es incluso más pequeño que en el resto de casos, por lo que la hipótesis de que éstas se descompongan en otras más pequeñas no tiene sentido.

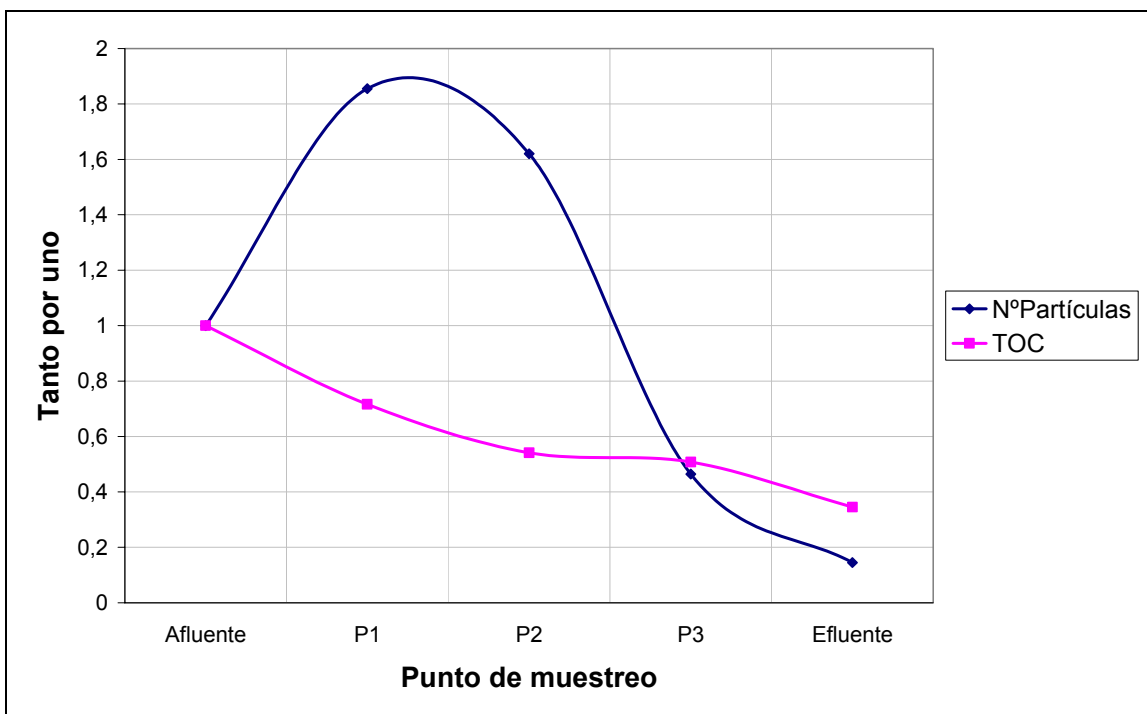


Figura 5.19: Eliminación del número total de partículas y el TOC a lo largo del humedal D2, correspondiente al lunes de la campaña de julio.

Cuando comparamos la evolución en tanto por uno del número de partículas, tampoco obtenemos el resultado esperado: La Figura 5.19 vemos como la evolución del TOC no tiene ningún parecido con la del número total de partículas. Si la causa del aumento del número de partículas hubiera sido un aporte exterior de materia, esto debería haberse reflejado también en la cantidad de materia orgánica en el humedal, pero su evolución es parecida a las obtenidas en el resto de muestreos.

Por estos motivos se dedujo que las muestras no se habían conservado correctamente. Una vez se llegó a esta conclusión se observó que en estas muestras había un precipitado. Ésta es la causa de que el conteo de partículas no sea correcto. Los precipitados han modificado la distribución de tamaños y las muestras no son representativas de lo que realmente sucede en el humedal.

Con el objetivo de evitar este fenómeno en campañas futuras, se procedió a aislar este precipitado por evaporación de varias de las muestras, y se llevó a analizar mediante difracción de rayos X al Parque Tecnológico de Barcelona. Este método de análisis se basa en el fenómeno físico a través del cual se manifiesta la interacción fundamental de los rayos X con los cristales (materia ordenada). La Figura 5.20 muestra los resultados gráficos de este análisis.

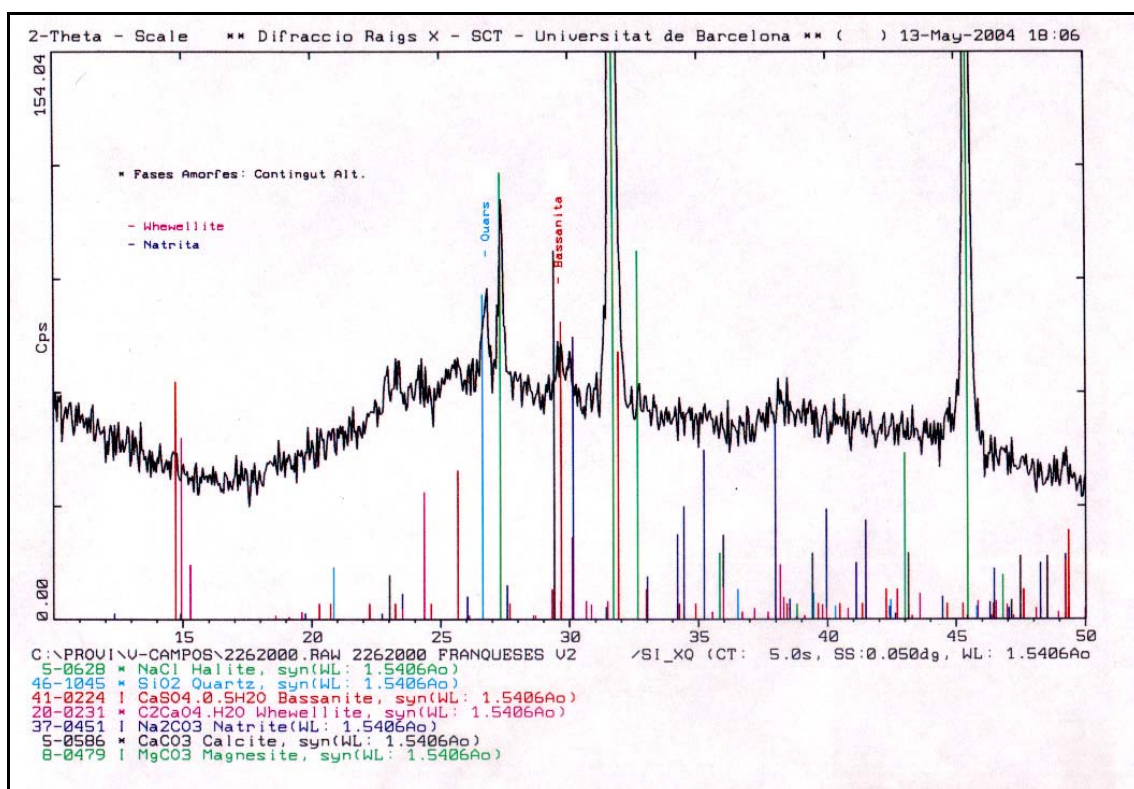


Figura 5.20: Resultado gráfico de la composición del precipitado obtenido en las muestras de las campañas de julio y agosto en el humedal D2, según un análisis de difracción de rayos X.

Como puede comprobarse, el precipitado muestra, además de una gran cantidad de materia amorfa, compuestos como basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y whewellita ($\text{C}_2\text{CaO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ambos con contenido de calcio. Encontramos también carbonatos en forma de natrilita (Na_2CO_3)

La precipitación de compuestos de calcio, principalmente en forma de carbonatos, es un fenómeno común en los ambientes acuáticos donde existe descomposición bacteriana de materia orgánica. Este fenómeno es conocido como MCP (microbiological carbonate precipitation). Para que se produzca este tipo de precipitación se requiere, además de la existencia de calcio, que el ambiente sea básico (Hammes et al., 2002).

En el caso de nuestras muestras se ha evitado esta precipitación mediante la adición de ácido clorhídrico, que crea el ambiente ácido adverso para la aparición de este fenómeno.

En un principio se pensó que tal vez la precipitación se produjo por no haber añadido suficiente HCl a las muestras de las campañas en que se produjo la precipitación. Por ello se hizo una medición del PH y se comparó con la del resto de campañas. El resultado fue que todas las muestras tenían PH's similares, con valores entre 2 y 3. Se dedujo entonces que en estas muestras no se añadió el HCl con suficiente rapidez, de forma que en el lapso de tiempo desde la toma hasta el añadido del ácido se produjo la precipitación de los compuestos de calcio.

5.1.3. Tercera campaña

La tercera campaña se llevó a cabo en el mes de agosto de 2003, con una duración de cinco días.

5.1.3.1. Humedal C2

En el humedal C2 se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en las dos primeras campañas. Como resumen de los resultados y para ilustrar la similitud de estos con los resultados del humedal C2 en las campañas de muestreo anteriores, se muestran en las Figuras 5.21 y 5.22 las gráficas de eliminación de número total de partículas y de TOC.

En la primera de ellas se aprecia como la tendencia es la misma que en las dos primeras campañas. Aunque el efluente correspondiente al viernes tiene a la salida un contenido de partículas un poco mayor que en el resto de casos correspondientes al humedal C2, en ningún caso el número de partículas a la salida del humedal ha superado el 15% del entrante.

En cuanto a la segunda de ellas, en que se refleja la eliminación del TOC, podemos ver como los resultados son muy similares a los del resto de campañas.

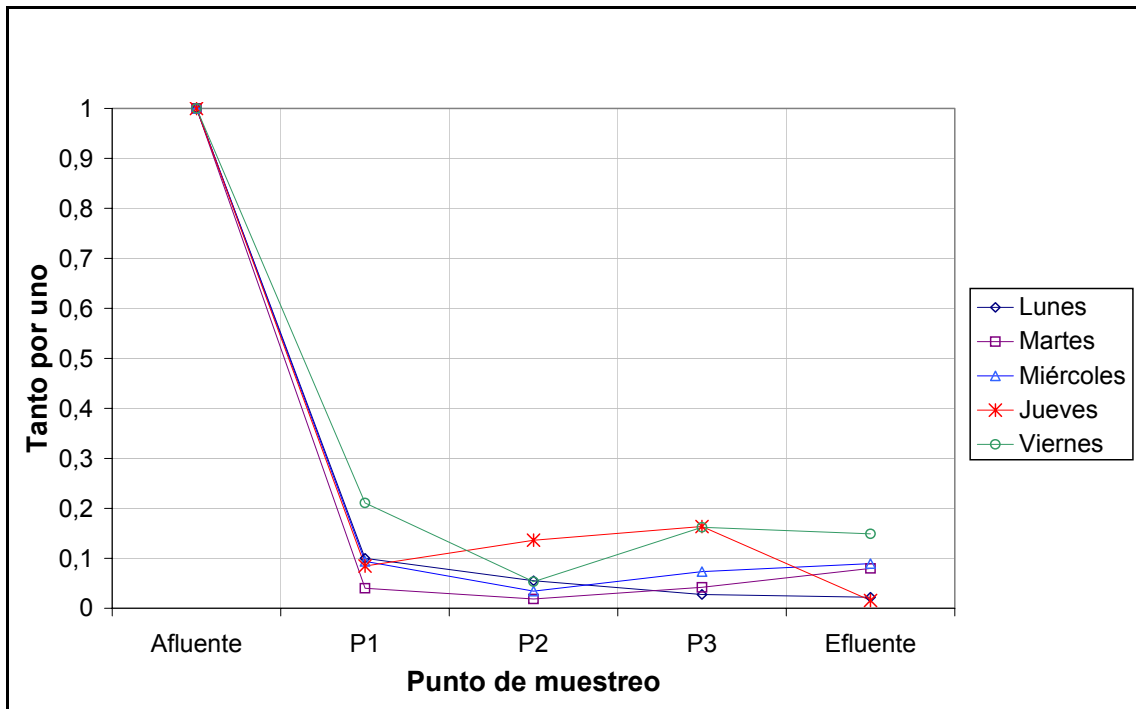


Figura 5.21: Eliminación por días del número total por de partículas a lo largo del humedal C2, correspondiente a la campaña de agosto.

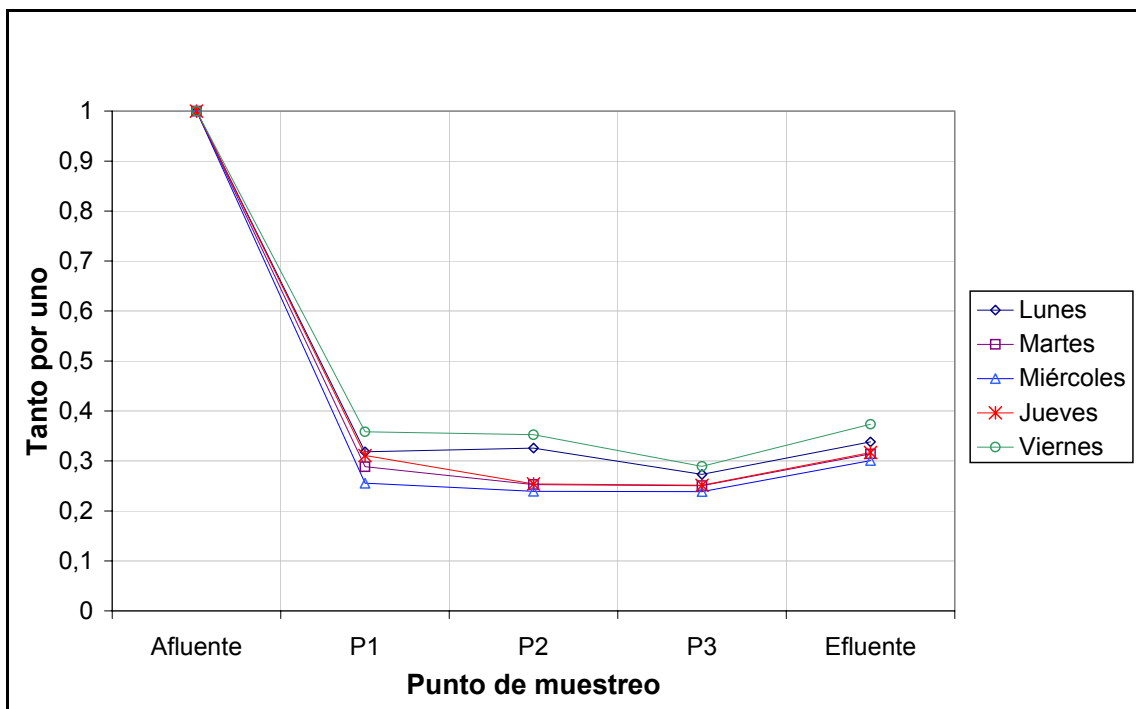


Figura 5.22: Eliminación por días del TOC a lo largo del humedal C2 correspondiente a la campaña de agosto.

5.1.3.2. Humedal D2.

En esta tercera campaña se repitieron los problemas que hubo en la segunda campaña en el humedal D2. Los resultados han sido muy similares. No se aprecia eliminación progresiva del número de partículas ni correlación lógica entre la composición de las muestras de un mismo día en los diferentes puntos de muestreo.

Los resultados se incluyen en el CD adjunto.

5.1.4. Cuarta campaña

La cuarta campaña se llevó a cabo en el mes de diciembre de 2003, con una duración de cinco días.

Esta última campaña realizada se llevó a cabo con el objetivo de determinar en qué medida la temperatura ambiente puede afectar al funcionamiento de los humedales y a los procesos que se dan en el interior de estos, puesto que al contrario de las demás, llevadas a cabo durante los meses de verano, esta se realizó en diciembre.

Como se verá en los siguientes apartados no parece que la temperatura sea muy determinante en el funcionamiento de los humedales en cuanto a los parámetros que nosotros hemos analizado.

5.1.4.1. Humedal C2

Este humedal presentó resultados similares a los obtenidos en campañas anteriores. Se muestra en la Figura 5.23 la evolución del número total de partículas a lo largo del humedal para cada uno de los días de muestreo, con excepción del miércoles.

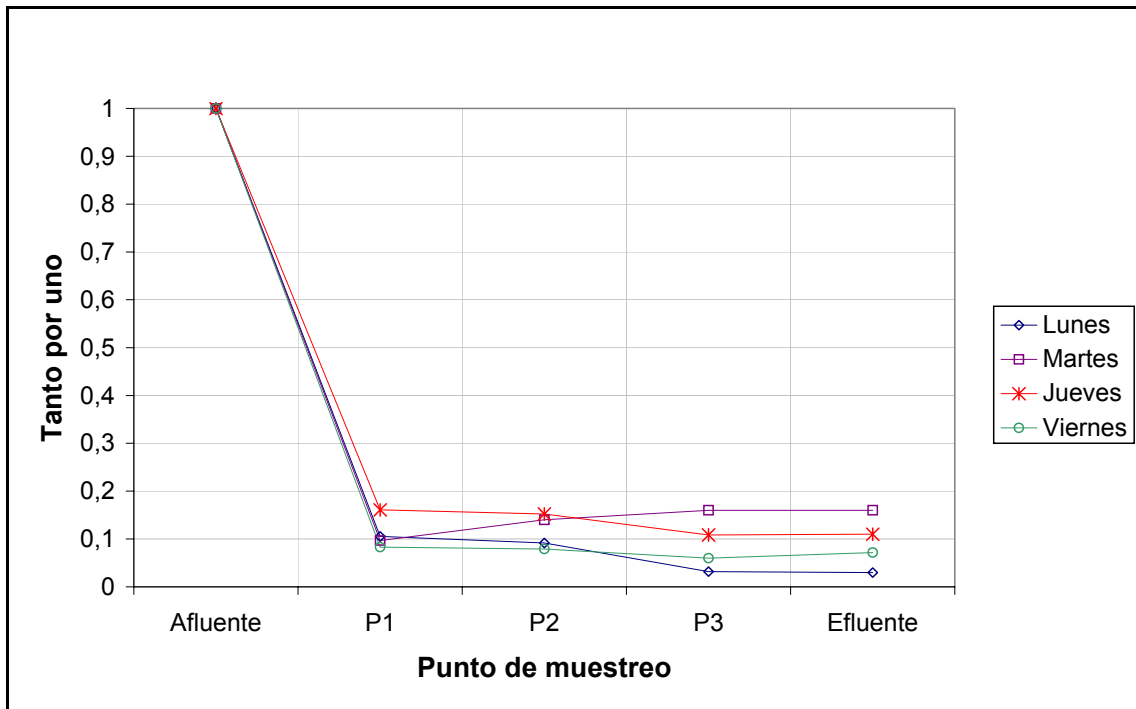


Figura 5.23: Eliminación según días del número total de partículas a lo largo del humedal C2, correspondiente a la campaña de diciembre de muestreo.

La gráfica del tanto por uno de TOC eliminado a lo largo del humedal (Figura 5.24) también tuvo resultados similares, aunque alguna de las muestras resultó contaminada y se han tenido que extrapolar algunos de los datos a partir de los conocidos. El resultado se muestra a continuación. A pesar de que ha habido mayor dispersión de resultados, los valores obtenidos son del orden de los obtenidos anteriormente.

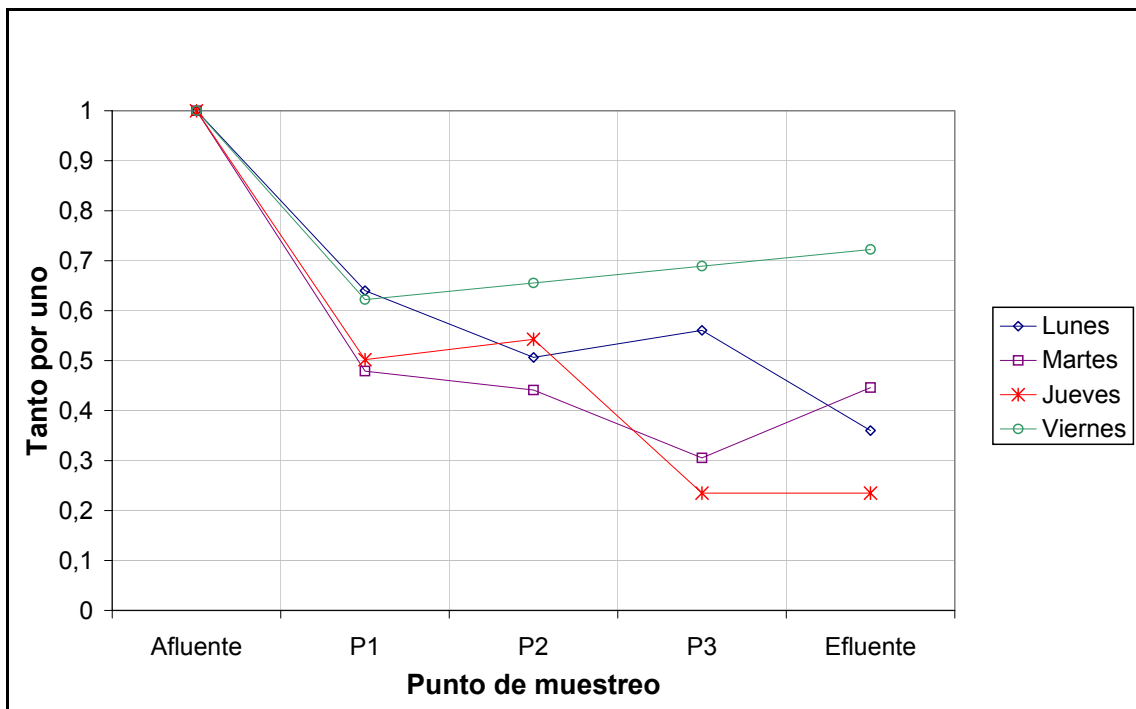


Figura 5.24: Eliminación por días del TOC a lo largo del humedal C2, correspondiente a la campaña de diciembre.

5.1.4.2. Humedal D2

También en este muestreo se han obtenido resultados similares al resto de casos. Se resumen estos resultados mediante las gráficas de evolución en tanto por uno de número total de partículas y TOC (Figuras 5.25 y 5.26 respectivamente).

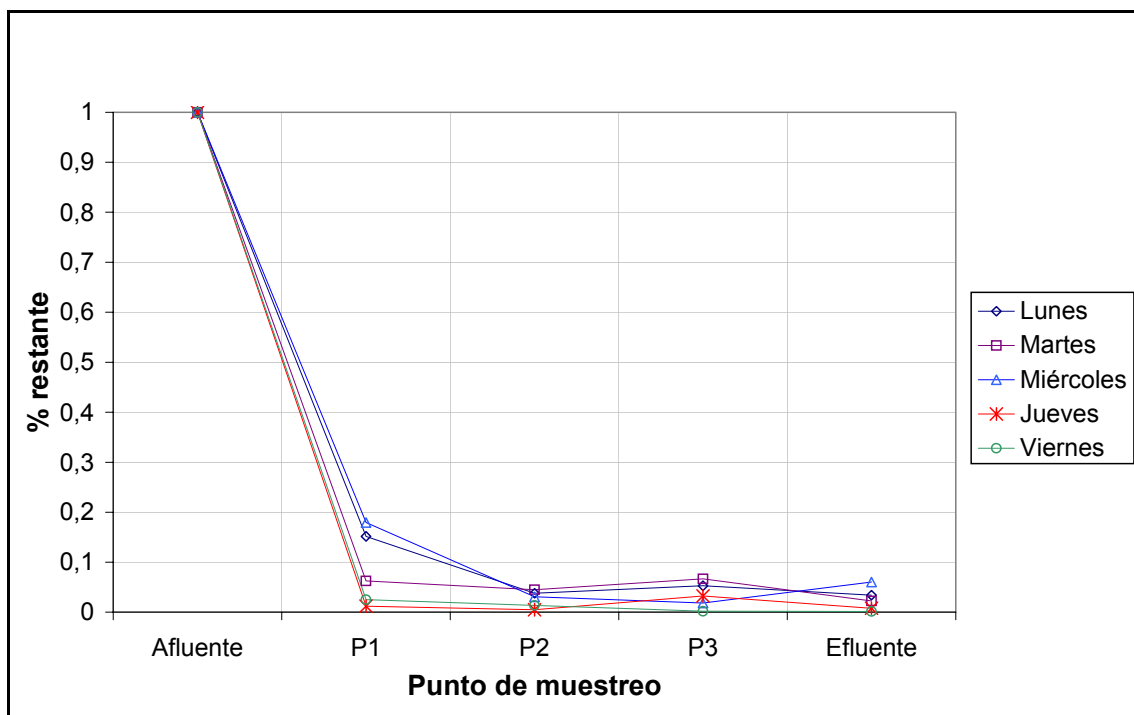


Figura 5.25: Eliminación según días del número total de partículas a lo largo del humedal D2 correspondiente a la campaña de diciembre.

Al igual que en el humedal C2, en este caso también se han tenido que extrapolar algunos de los datos, y no se pudo obtener datos del miércoles.

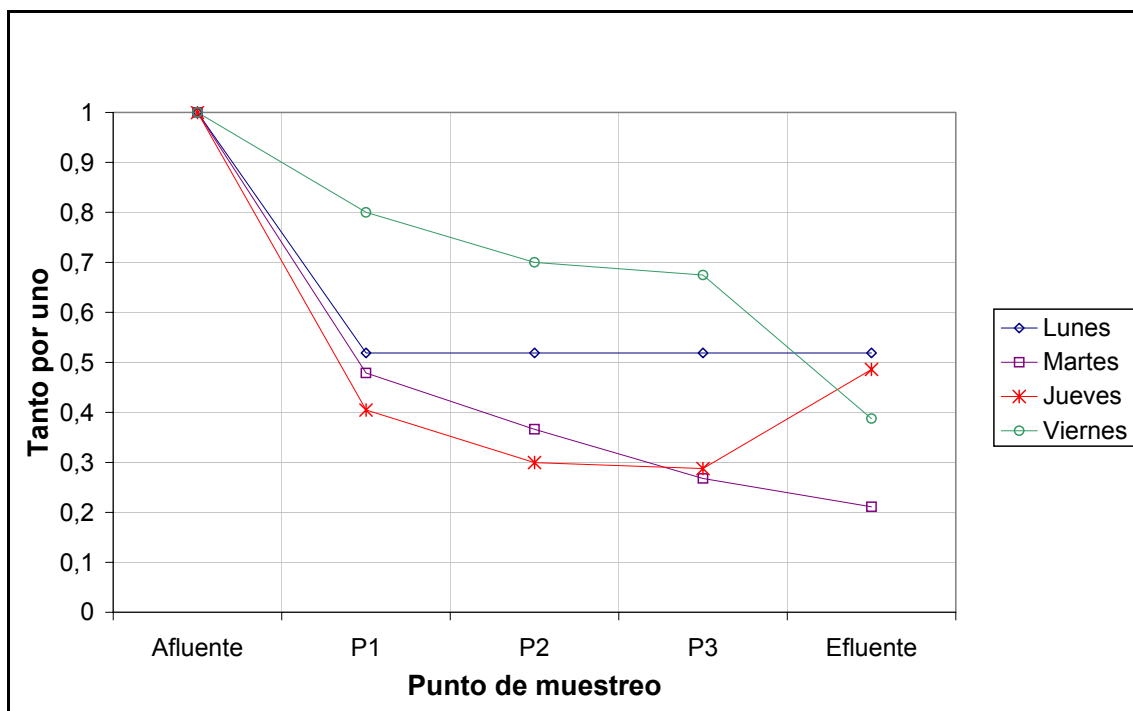


Figura 5.26: Eliminación por días del TOC a lo largo del humedal D2 correspondiente a la campaña de diciembre.

5.2. Modelización cinética

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ajustes de los resultados de las campañas a los modelos teóricos explicados en el Capítulo 3.

5.2.1. Modelización del número total de partículas

En primer lugar se procedió al ajuste de las medias del número total de partículas obtenidas para cada una de las cuatro campañas de muestreo en ambos humedales.

El ajuste se hace por tanto en cada caso a cinco datos empíricos correspondientes al número de partículas contenidas en el afluente y el efluente de los humedales, y en los tres puntos de toma de muestra intermedios. Se trabajó con datos normalizados mediante el número mayor de partículas en el muestreo, de forma que los valores están comprendidos en todos los casos entre 1 (valor que corresponde al afluente del humedal) y 0.

La Figura 5.27 muestra los ajustes al número total de partículas obtenidos mediante los cuatro modelos hidráulicos, correspondiente al humedal C2 en la campaña de diciembre.

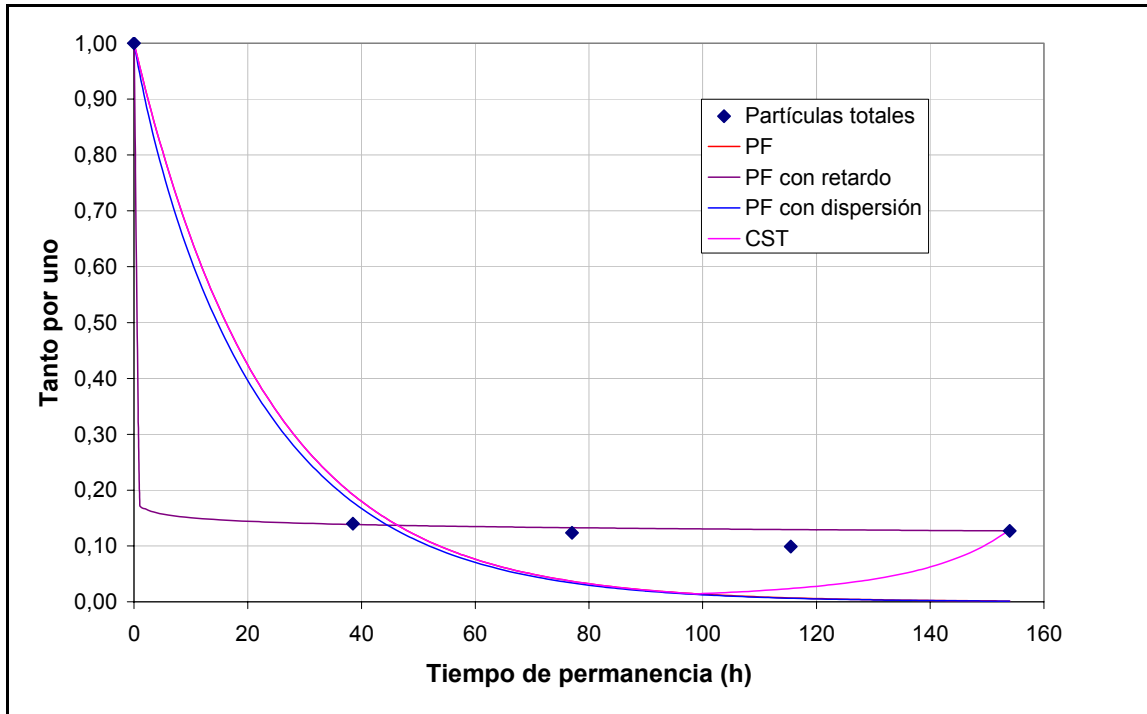


Figura 5.27: Modelización cinética de la eliminación del número total de partículas en el humedal C2, campaña de diciembre, según cuatro modelos teóricos.

Las constantes que nos han permitido obtener estos ajustes, y los errores cuadráticos que cometidos son los que se muestran en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5: Constantes y errores obtenidos para el ajuste cinético de la eliminación del número total de partículas en el muestreo de diciembre en el humedal C2.

	PF	PF con retardo		PF con dispersión	CST
	Kpf	Kpfr	Rpfr	Kpfd	Kcst
Constante	0,04	4,22E+54	1,76E+12	0,06	0,04
Error	0,14		0,03	0,13	0,12

Para el resto de campañas los resultados gráficos fueron similares. Con el objetivo de ilustrar esta similitud de resultados, se muestran en el Anejo 3 los resultados gráficos obtenidos en la modelización cinética de la campaña de junio, para los humedales C2 y D2. El resto de gráficas se incluyen en el CD adjunto.

Los valores de las constantes de eliminación obtenidas, así como de los errores que se comete en el ajuste mediante estas constantes, se resumen en las Tablas 5.6 y 5.7.

Tabla 5.6: Constantes obtenidas para el ajuste cinético de la eliminación del número total de partículas en los diferentes muestreos y humedales.

Humedal	Campaña	Kpf	Kpfr	Rpfr	Kpfd	Kcst
C2	Junio	0,06	1,16E-01	9,00E-01	0,08	0,24
	Julio	0,05	1,81E-01	2,06E-01	0,07	0,04
	Agosto	0,04	8,94E+00	1,37E+01	0,06	0,03
	Diciembre	0,04	4,22E+54	1,76E+12	0,06	0,04
D2	Junio	0,09	1,33E-01	6,47E-02	0,11	0,13
	Diciembre	0,09	3,47E-01	2,86E-01	0,16	0,02

Tabla 5.7: Errores obtenidos en la eliminación de partículas totales, mediante las constantes resumidas en la Tabla 5.6, para los diferentes muestreos y humedales.

Humedal	Campaña	Error (pf)	Error (pfr)	Error (pfd)	Error (cst)
C2	Junio	0,06	0,03	0,06	0,05
	Julio	0,09	0,03	0,08	0,08
	Agosto	0,12	0,03	0,12	0,07
	Diciembre	0,14	0,03	0,13	0,12
	MEDIA	0,10	0,03	0,10	0,08
D2	Junio	0,06	0,07	0,06	0,04
	Diciembre	0,07	0,02	0,04	0,06
	MEDIA	0,06	0,04	0,05	0,05

5.2.2. Modelización según rangos de partículas

Con el objetivo de comprobar si el diámetro de las partículas influye en la cinética de eliminación de las mismas, se hicieron las mismas comprobaciones hechas en el apartado anterior, pero según rangos. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 5.8 y 5.9.

El Anejo 3 incluye los resultados gráficos obtenidos en la modelización según rangos de partículas, para los humedales C2 y D2 en la campaña de junio. El resto de gráficas están incluidas en el CD adjunto.

Tabla 5.8: Constantes obtenidas para el ajuste cinético de la eliminación de partículas en los diferentes muestreos y humedales.

ϕ (μm)	Humedal	Campaña	Kpf	Kpfr	Rpfr	Kpfd	Kest	
0,7-1	C2	Junio	0,06	1,20E-01	2,90E-01	0,07	0,22	
		Julio	0,04	1,35E-01	1,56E-01	0,03	0,01	
		Agosto	0,04	1,80E+13	1,41E+01	0,05	0,02	
		Diciembre	0,04	6,74E+15	1,07E+08	0,06	0,04	
	D2	Junio	0,08	1,04E-01	3,73E-02	0,10	0,08	
		Diciembre	0,08	2,56E-01	1,59E-01	0,17	0,02	
	1-2	C2	Junio	0,05	1,24E-01	1,00E+00	0,06	0,27
			Julio	0,05	3,23E-01	3,34E-01	0,06	0,03
Agosto			0,02	2,27E+02	6,50E+27	0,03	0,03	
Diciembre			0,05	1,93E+40	6,34E+28	0,06	0,05	
D2		Junio	0,07	3,76E+11	3,80E+12	0,08	0,05	
		Diciembre	0,06	3,50E+04	1,45E+05	0,09	0,05	
2-3		C2	Junio	0,06	7,06E-01	4,11E+00	0,09	0,36
			Julio	0,06	3,35E+00	6,57E+00	0,07	0,06
	Agosto		0,03	2,00E+27	6,73E+26	0,04	0,04	
	Diciembre		0,03	3,48E+55	6,30E+28	0,02	0,03	
	D2	Junio	0,08	3,71E+00	8,01E+00	0,18	0,31	
		Diciembre	0,06	1,60E+06	1,34E+07	0,07	0,02	
	3-4	C2	Junio	0,10	1,02E+00	4,11E+00	0,14	0,36
			Julio	0,07	4,41E+00	1,03E+01	0,09	0,06
Agosto			0,02	1,46E+02	2,06E+02	0,04	0,03	
Diciembre			0,02	4,98E+55	6,34E+28	0,03	0,02	
D2		Junio	0,08	8,88E-01	1,41E+00	0,11	0,02	
		Diciembre	0,08	2,28E+27	8,94E+28	0,11	0,09	
>4		C2	Junio	0,04	8,51E+30	4,19E+05	0,09	0,20
			Julio	0,02	2,30E+31	1,24E+33	0,03	0,02
	Agosto		0,02	9,18E+59	6,34E+28	0,03	0,01	
	Diciembre		0,01	2,02E+88	6,34E+28	0,03	0,02	
	D2	Junio	0,08	3,01E+31	1,24E+33	0,03	0,21	
		Diciembre	0,04	6,30E+59	7,88E+61	0,03	0,02	

Tabla 5.9: Errores obtenidos según las constantes contenidas en la Tabla 5.8, en el ajuste cinético de la eliminación de partículas en los diferentes muestreos y humedales.

ϕ (μm)	Humedal	Campaña	Epf	Epf _r	Epf _d	Ecst	
0,7-1	C2	Junio	0,06	0,03	0,06	0,05	
		Julio	0,12	0,03	0,10	0,10	
		Agosto	0,10	0,04	0,10	0,10	
		Diciembre	0,10	0,03	0,12	0,12	
		MEDIA	0,09	0,03	0,09	0,09	
	D2	Junio	0,06	0,08	0,06	0,05	
		Diciembre	0,10	0,03	0,03	0,09	
		MEDIA	0,08	0,06	0,05	0,07	
	1-2	C2	Junio	0,12	0,01	0,14	0,05
			Julio	0,10	0,03	0,12	0,04
Agosto			0,24	0,02	0,20	0,04	
Diciembre			0,19	0,03	0,19	0,13	
MEDIA			0,16	0,02	0,16	0,06	
D2		Junio	0,20	0,17	0,18	0,05	
		Diciembre	0,18	0,06	0,12	0,02	
		MEDIA	0,19	0,11	0,15	0,04	
2-3		C2	Junio	0,13	0,03	0,12	0,04
			Julio	0,09	0,03	0,11	0,04
	Agosto		0,17	0,07	0,17	0,04	
	Diciembre		0,35	0,06	0,34	0,20	
	MEDIA		0,18	0,05	0,18	0,08	
	D2	Junio	0,18	0,04	0,17	0,08	
		Diciembre	0,20	0,05	0,18	0,09	
		MEDIA	0,19	0,05	0,17	0,08	
	3-4	C2	Junio	0,08	0,03	0,08	0,07
			Julio	0,07	0,03	0,07	0,05
Agosto			0,23	0,03	0,16	0,05	
Diciembre			0,40	0,09	0,40	0,26	
MEDIA			0,20	0,05	0,18	0,11	
D2		Junio	0,20	0,02	0,16	0,11	
		Diciembre	0,22	0,08	0,22	0,13	
		MEDIA	0,21	0,05	0,19	0,12	
>4		C2	Junio	0,31	0,03	0,30	0,27
			Julio	0,32	0,01	0,31	0,23
	Agosto		0,25	0,03	0,25	0,12	
	Diciembre		0,43	0,05	0,57	0,24	
	MEDIA		0,33	0,03	0,36	0,21	
	D2	Junio	0,24	0,05	0,61	0,21	
		Diciembre	0,39	0,06	0,36	0,23	
		MEDIA	0,32	0,05	0,49	0,22	

5.3. Discusión de resultados

A pesar de que dos de las campañas de muestreos han sufrido alteraciones y no se puede disponer por ello de los resultados, el hecho de que el resto de campañas hayan tenido resultados muy similares permite deducir algunos aspectos del funcionamiento de los humedales.

5.3.1. Conteo de partículas

A la vista de los resultados obtenidos, se puede definir una evolución predominante de la distribución de tamaños de partículas a lo largo de los humedales.

Al observar como es la evolución de la eliminación del número total de partículas dentro de los humedales, se puede ver a simple vista dos fenómenos. El primero es que la reducción del número total de partículas es muy elevada. En el peor de los casos analizados, el total de partículas en el efluente es inferior el 16 % del total de partículas presentes en el afluente, aunque por norma general este porcentaje está comprendido entre el 1 y el 8 %. La media obtenida para todas las campañas en ambos humedales es del 6 %.

En segundo lugar se advierte que de forma muy evidente, esta eliminación se da principalmente en los primeros metros de los humedales. Del total de partículas entrantes, ya en el primer punto de muestreo, que se encuentra a tan solo un cuarto del camino que recorre el agua dentro del humedal (2,6 y 2,9 metros de recorrido en el humedal C2 y D2 respectivamente), el número total de partículas ha descendido en media al 17 % del total de partículas del afluente.

Se muestran en la Tabla 5.10 las medias de los porcentajes de número de partículas restantes en el humedal de los cinco días que abarca cada campaña, según humedal y según los puntos de muestreo.

Tabla 5.10: Evolución del número total de partículas según humedal y según campaña de muestreo.

Campaña	Humedal	Número de partículas en el afluente	% de partículas restantes en P1	% de partículas restantes en el efluente
Junio	C2	38274	18 %	3 %
	D2		27 %	4 %
Julio	C2	21448	17 %	8 %
Agosto	C2	33932	11 %	4 %
Diciembre	C2	18544	11 %	10 %
	D2		5 %	3 %

Nos detenemos ahora a analizar la composición según el tamaño de las partículas del agua residual entrante en los humedales. Ésta ha sido previamente sometida a un

tratamiento primario consistente en un tanque Imhoff. Este tratamiento primario elimina partículas de tamaños mayores a 40 μm por sedimentación y flotación (Tchobanoglous, 2003).

Al observar los histogramas de composición del agua (Anejo 2.1 y CD) según rangos de diámetros de partículas, se aprecia que a la entrada del humedal el agua residual está principalmente formada por partículas de tamaños que oscilan entre 0,7 y 2 μm .

Este rango de partículas representa siempre en los afluentes un tanto por ciento sobre el total de partículas mayor al 94 %. De esta cantidad de partículas entrantes correspondiente al rango entre 0,7 y 2 μm , la media restante en el efluente es de tan solo un 6 % en el humedal C2 y de un 3 % en el D2. Se aprecia también en los histogramas que las partículas de diámetros mayores a 2 μm son prácticamente inexistentes a la salida del humedal.

Se muestran en la Tabla 5.11 los porcentajes de número de partículas entre 0,7 y 2 μm restantes en los humedales, según humedal y según los puntos de muestreo. Cada valor es una media de los valores correspondientes a los cinco días de muestreo que abarca cada campaña.

Tabla 5.11: Evolución del número total de partículas entre 0,7 y 2 μm según humedal y según campaña de muestreo.

Campaña	Humedal	% 0,7<Φ<2 μm (afluente respecto del total)	% 0,7<Φ<2 μm (P1 respecto del afluente)	% 0,7<Φ<2 μm (efluente respecto del afluente)
Junio	C2	97 %	18 %	3 %
	D2		31 %	4 %
Julio	C2	97 %	17 %	8 %
Agosto	C2	96 %	11 %	7 %
Diciembre	C2	96 %	11 %	7 %
	D2		8 %	2 %

Como se aprecia en la Tabla 5.11, en el caso de este rango de tamaños la evolución del número total de partículas es similar a la del cómputo global. La media de reducción de partículas de diámetros entre 0,7 y 2 μm en el humedal C2, para el primer tramo de 2,57 metros que separa la entrada del punto de muestreo P1, es del 86 %, mientras que en el D2, en el que esta separación es de 2,9 metros, es del 81 %. En cuanto a las partículas de diámetro mayor, podemos apreciar en los histogramas que ya en este primer punto de muestreo son prácticamente inexistentes (Ver Anejo 2.1 y CD).

Estos resultados ponen en evidencia que el mecanismo responsable de esta eliminación de partículas en los primeros metros de humedal es la filtración. Las partículas quedan retenidas por procesos físicos como son el efecto tamiz (intercepción en los poros por ser estos menores que el diámetro de la partícula) o el efecto de intercepción directa (las partículas al acercarse a la superficie de la grava a una distancia menor que su radio, son interceptadas y quedan adheridas). Si la eliminación de partículas se produjera por mecanismos de hidrólisis en el líquido u otro tipo, sería lógico pensar que la eficiencia fuera constante a lo largo de todo el humedal, cosa que no ocurre.

Esto significa que en realidad las partículas no son degradadas rápidamente, sino que quedan retenidas, creándose en los primeros metros del humedal una acumulación muy importante de partículas, y por lo tanto de la materia orgánica y el resto de contaminantes que van asociados a ellas.

Cuando se analiza la evolución de la concentración de materia orgánica a lo largo del humedal, puede observarse como su comportamiento es análogo al del número de partículas. Hay un gran descenso entre el punto de entrada y el primer piezómetro, y una estabilización más adelante. Este comportamiento queda reflejado en el cálculo de las constantes de eliminación del a MO.

Por ejemplo, para el muestreo realizado en junio, en el humedal D2, se obtienen los valores de K_{TOC} según los diferentes tramos que se observan en la Figura 5.28. Ésta se ha calculado como la pendiente entre dos datos de concentración de materia orgánica.

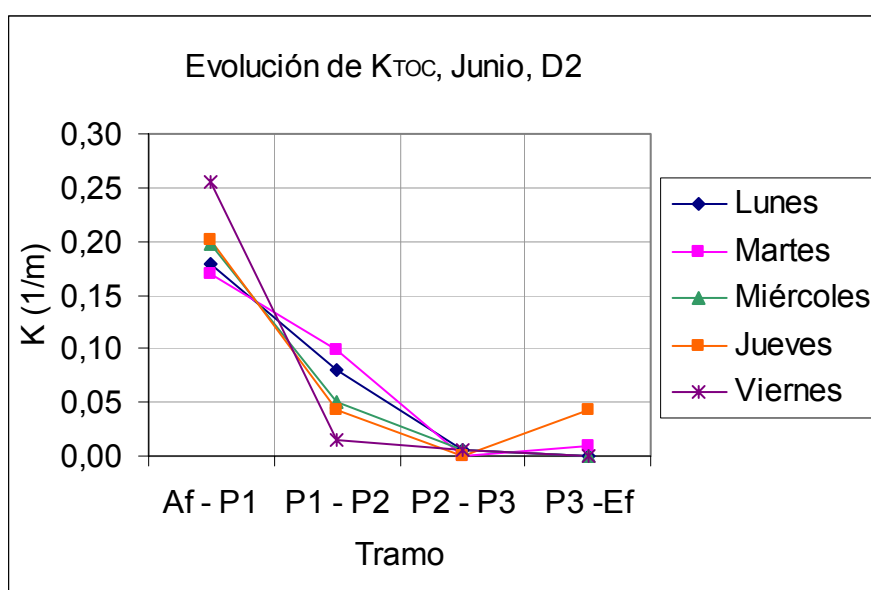


Figura 5.28: Evolución de K_{TOC} en el humedal D2 según los datos obtenidos en el muestreo correspondiente a la campaña de junio.

Se comprueba como de forma acorde a los artículos expuestos en la Revisión Bibliográfica, la constante de reducción de la MO va disminuyendo con la distancia recorrida por el agua residual, siendo esta reducción mucho más notable del primer al segundo tramo que en los sucesivos. El resto de gráficas correspondientes a la evolución de K de los otros muestreos se encuentran en el Anejo 2.2.

Sin embargo, al observar la gráficas comparativas entre la eliminación en tanto por uno del número total de partículas y de materia orgánica, vemos que indefectiblemente existe un decaje entre ambas. La cantidad de materia orgánica en el efluente es en todos los casos mayor al 20% de la entrante, mientras que el número de partículas no supera nunca el 16 %. Podemos apreciar este fenómeno en la Figura 5.29.

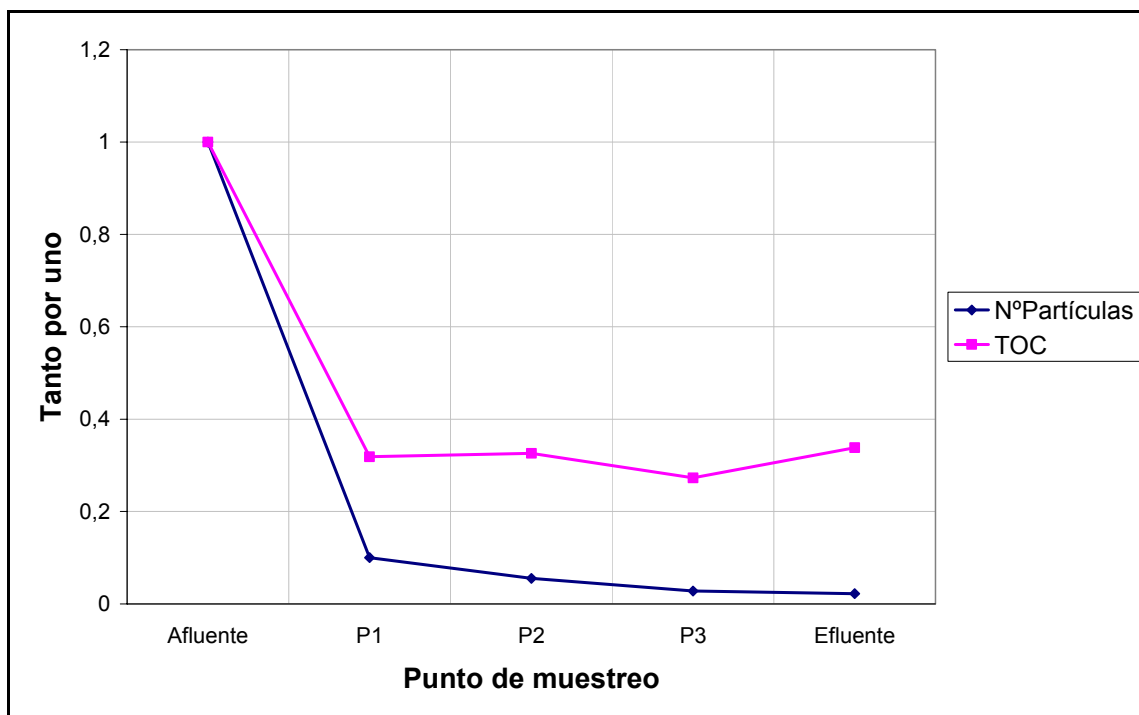


Figura 5.29: Eliminación del número total de partículas y el TOC a lo largo del humedal C2, correspondiente al lunes de la campaña de agosto.

En parte, este salto entre ambas propiedades es debido a que el Coulter Moulisizer II utilizado en el conteo de partículas no detecta aquellas con diámetros inferiores a 0,7 μm . Este rango de diámetros de partículas comprende las disueltas y una fracción de las coloidales. Estas partículas que no estamos contando en el cómputo global sí que están presentes en la estimación del TOC.

Tabla 5.12: Concentraciones típicas en aguas residuales domésticas (Metcalf & Eddy, 1991)

Componente	Intervalo de concentraciones		
	Alta	Media	Baja
1. Materia sólida, mg/l	1200	720	350
1.1. Disuelta total	850	500	250
1.1.1. Inorgánica	525	300	145
1.1.2. Orgánica	325	200	105
1.2. En suspensión	350	220	100
1.2.1. Inorgánica	75	55	20
1.2.2. Orgánica	275	165	80

Como se muestra en la Tabla 5.12, el porcentaje de MO disuelta del total de MO en un agua residual urbana suele ser de alrededor del 55 %, por lo que es lógico que este fenómeno se refleje en nuestros resultados.

Sin embargo, las MO presente en el humedal desde el primer piezómetro en adelante, no es únicamente esta MO disuelta que no queda retenida en los primeros metros.

Los primeros metros de humedal, al actuar como filtro, contienen gran cantidad de partículas de tamaños grandes que con el tiempo se hidrolizan y se descomponen en partículas más pequeñas. Estas partículas más pequeñas, continúan el camino a lo largo del humedal y se reflejan más adelante, tanto en el conteo de partículas como en la medición de la MO.

La hidrólisis es un proceso químico que consiste en el desdoblamiento de una molécula en presencia de agua, concretamente de iones H^+ , que hacen que el agua se comporte como un ácido débil.

Los humedales de flujo subsuperficial eliminan mejor la materia en suspensión que la MO porque la eliminación de materia en suspensión es un mecanismo completamente físico, mientras que la eliminación de MO es bastante más compleja. Las partículas biodegradables de mayor tamaño que se eliminan rápidamente por procesos físicos en los primeros metros del humedal donde quedan retenidas inicialmente, se degradan con el tiempo y se convierten por hidrólisis en partículas de los rangos más pequeños de los coloidales y solubles.

De esta forma, los primeros metros de humedal se convierten para el resto del mismo en una fuente de generación de materia orgánica disuelta.

La cantidad de MO en el efluente del humedal es por lo tanto un balance entre las aportaciones del afluente y la hidrolización en los primeros metros del humedal, y las reducciones por filtración y por mecanismos de eliminación de MO: fermentación anaeróbica, desnitrificación, sulfatorreducción y mentenogénesis.

Cuando se observa la evolución del TOC a lo largo del humedal, podría pensarse que la eficiencia de eliminación de materia orgánica por fermentación es casi nula, puesto que a partir del primer punto de muestreo, la tendencia de la gráfica es casi horizontal. Podríamos pensar que, aparte de la eliminación por filtración que se produce al principio del humedal, la materia orgánica no sufre ninguna transformación, que el resto del humedal no efectúa ninguna tarea útil sobre esta, y que es, por lo tanto, prescindible. Sin embargo, es importante saber en qué forma se encuentra esta materia orgánica, ya que no todos los compuestos orgánicos tienen la misma afectación sobre el medio natural.

Se han realizado ensayos para averiguar la naturaleza de esta materia orgánica para algunos de los días de muestreo, y ha podido observarse que la composición de ésta va variando a lo largo del humedal. Se ha analizado la concentración de algunos ácidos grasos volátiles, en concreto el ácido acético, el propiónico, el butírico, el isovalérico, el valérico, el hexanoico y el heptanoico.

En proporción, el ácido acético (CH_3COOH) es el componente orgánico prevalente del total de la materia orgánica. Por este motivo y como ejemplo de la variación de la composición de la materia orgánica, se muestra la evolución de la cantidad de ácido acético en el humedal para tres de los días de muestreo de la campaña correspondiente a junio, de los que se dispuso de datos:

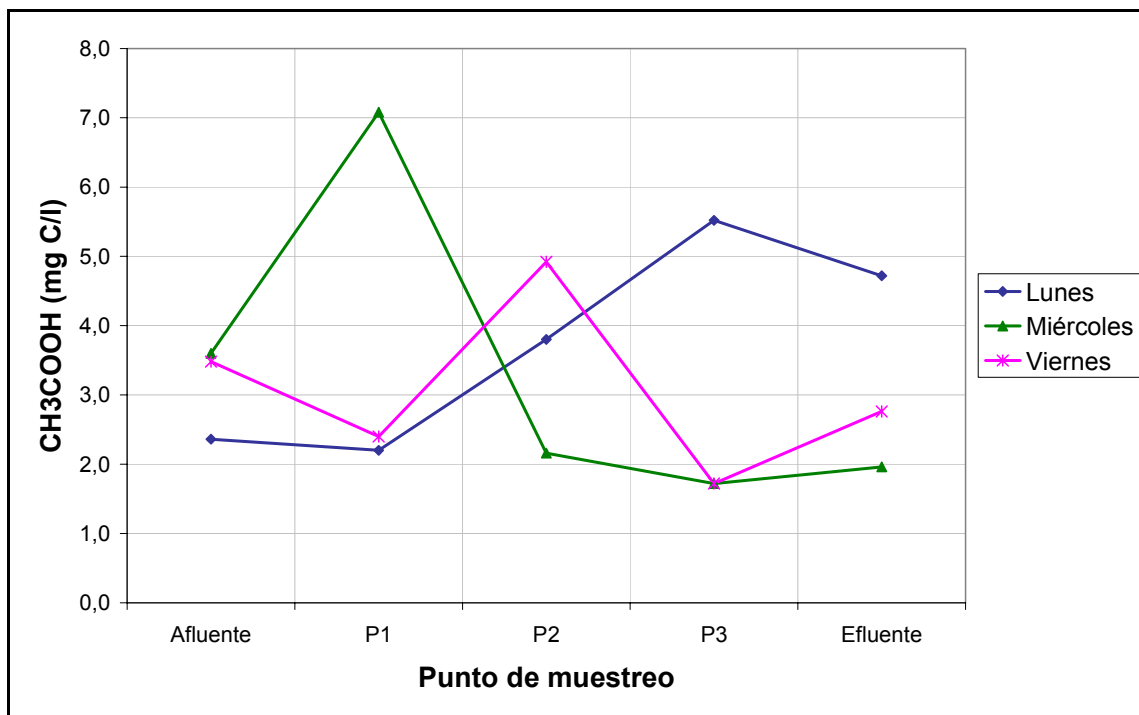


Figura 5.30: Evolución del CH_3COOH a lo largo del humedal C2 para tres de los días de muestreo de la campaña de muestreo de junio.

En la figura 5.30 podemos ver que la evolución de CH_3COOH no tiene ningún parecido con la del TOC. Éste tiene su máximo en el afluyente y experimenta un gran descenso hasta el punto de muestreo P1 para después mantenerse más o menos constante. Sin embargo en el caso del acético, aun no pudiéndose determinar una tendencia general, vemos que existe una fluctuación que indica que existen una producción y una eliminación internas continua en el humedal.

Si comparamos la cantidad de TOC y de CH_3COOH en un mismo día de muestreo este fenómeno queda claramente reflejado. A modo de ejemplo se muestran ambas concentraciones para el miércoles de la primera campaña de muestreo en el humedal C2.

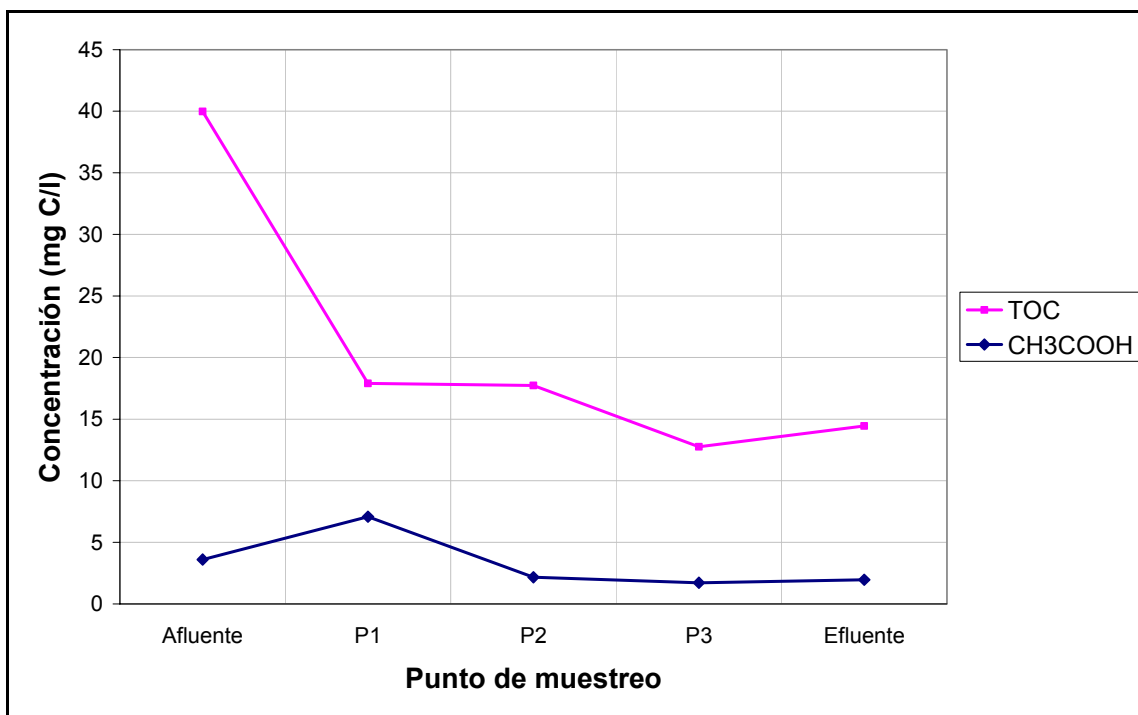


Figura 5.31: Concentración de TOC frente a la concentración de ácido acético, correspondiente al miércoles de la campaña de junio.

En la Figura 5.31 podemos apreciar que la evolución del acético es totalmente independiente de la del TOC.

El ácido acético es un compuesto intermediario de la degradación de muchos compuestos orgánicos, más asimilable por el medio ambiente. Es además el sustrato necesario para que se produzca la metanogénesis y la sulfatorreducción, que son dos de los procesos de eliminación biológica de materia orgánica. La fluctuación de la cantidad de ácido acético nos indica que en el interior del humedal se da una producción de éste por descomposición de compuestos orgánicos complejos, al mismo tiempo que se elimina por ser sustrato de reacciones de digestión.

El hecho de que en los humedales intervengan tantos fenómenos es el motivo por el que la eficiencia de los mismos sea tan difícil de predecir. Es también la causa de que la mejora de la calidad del agua sea tan variable de unos a otros. A la vista de los resultados, parece evidente que la forma en que se encuentra la MO de un agua y la proporción entre disuelta y particulada en que se presenta, condiciona fuertemente los procesos de eliminación a los que se verá sometida, y por tanto, la eficiencia con la que será eliminada. Un humedal será más o menos eficiente no sólo en función de su diseño, sino también en función del tipo de agua que tenga que tratar.

Si se consiguiera que el agua a tratar por los humedales no contuviera tanta fracción particulada de MO, sería lógico esperar que, al eliminar la acumulación de partículas en los metros iniciales y por lo tanto, su posterior hidrolización, la eficiencia de estos aumentara, aumentando a su vez la calidad del agua en el efluente.

Como la mayor parte de las partículas entrantes están comprendidas entre 0,7 y 2 μm , el pretratamiento al que se sometiera el agua afluente debería actuar preferentemente sobre

este rango de tamaños. Se podría optar por un pretratamiento consistente en un sistema de coagulación-floculación, o bien por un sistema de microfiltración.

En el caso de implantar un sistema de coagulación-floculación, tan solo se necesitaría instalar un tanque de mezcla rápida, y una pequeña bomba dosificadora del coagulante, puesto que el tanque Imhoff ya actúa como sedimentador, por lo que esto no supondría un gasto ni de espacio ni de dinero importantes. La microfiltración, aunque también eliminaría las partículas entre 0,7 y 2 μm , obligaría a un mantenimiento continuado de los filtros y resultaría demasiado caro.

5.3.2. Modelización cinética

Una vez hechas las primeras modelizaciones cinéticas, podemos realizar varias conclusiones. La primera y más evidente es que, a la vista de los errores obtenidos, el modelo que mejor ajusta la eliminación de partículas en el humedal es el modelo de flujo en pistón con retardo. Este error está comprendido entre el 0,01 y el 0,1 en todos los casos, con la salvedad del humedal D2, en el muestreo de junio para partículas entre 1 y 2 μm .

Sin embargo, para el ajuste de este modelo, al contrario que en el resto de los utilizados, se cuenta con dos grados de libertad (k y R) para realizar el ajuste, por lo que resulta lógico que el error sea sensiblemente menor.

Se observa además como los valores que se han obtenido del parámetro R tienen una gran dispersión. El rango va desde valores de exponentes -2 a valores de exponentes +30. Lo mismo ocurre con los valores de k que nos proporcionan estos ajustes.

El hecho de que los valores de R y k sean tan distintos en los diferentes casos, no nos permite dar por válida en una primera aproximación ésta modelización.

En el caso de la modelización mediante el sistema de tanques en serie, se puede ver claramente que los valores de T_{delay} obtenidos de la literatura dan lugar a resultados erróneos para el caso de la eliminación de partículas. Como se muestra en la Figura 5.32, cuando la constante de eliminación obtenida para el segundo tramo de la modelización (es decir, para el tramo regido por la ecuación de los tanques en serie, y no para el reactor de flujo en pistón) es de valor positivo, la curva obtenida es creciente ($\frac{dC}{dt} > 0$).

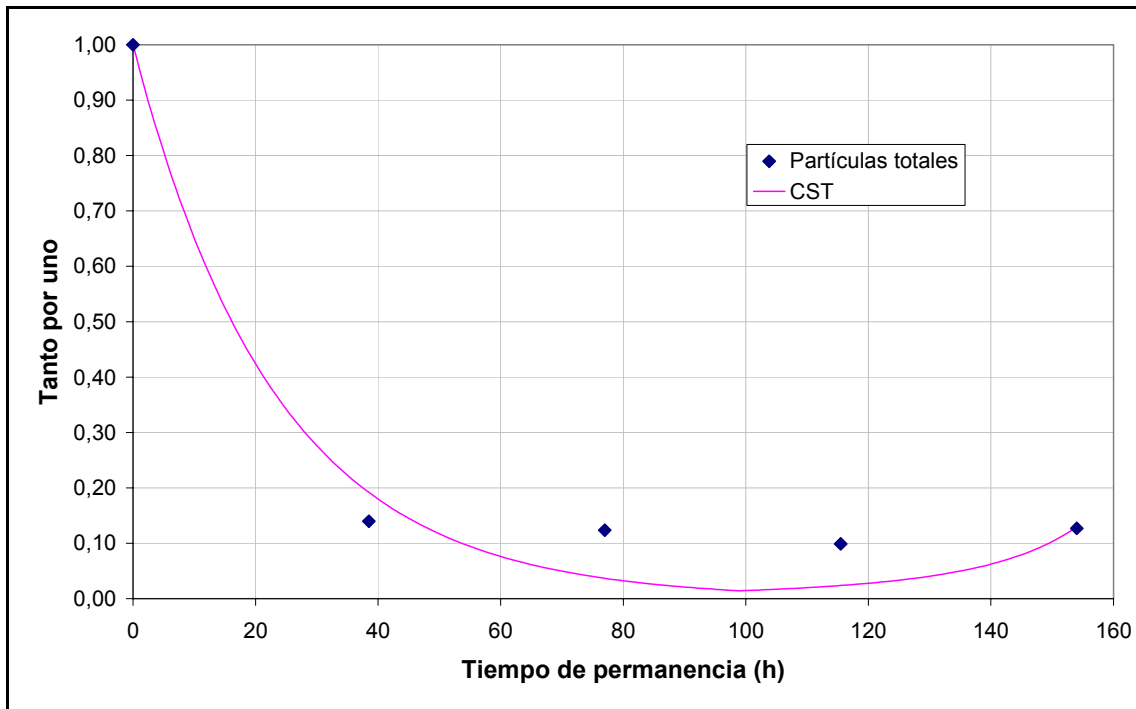


Figura 5.32: Ajuste mediante el modelo CST para los valores de T_{delay} proporcionados en la literatura.

Una modelización de este tipo indicaría que en el último tramo del humedal, el número de partículas crece. Esta conclusión es errónea, y se deriva del hecho de que en esta simulación, la eliminación dada en el tiempo t_{delay} , en que se pasa de modelizar con un reactor de flujo en pistón a modelizar con los tanques en serie, es ya superior a la eliminación al final del humedal. Por este motivo, al buscarse la mejor aproximación, el tramo final de la curva crece hasta acercarse a los valores reales.

Este fenómeno nos indica que los valores de t_{delay} obtenidos en anteriores trabajos, no son válidos para la modelización de la cinética de la eliminación de partículas en los humedales, puesto que, aún teniendo errores similares a otros ajustes como los modelos PF y PFR, dan lugar a curvas de eliminación conceptualmente erróneas.

Las modelizaciones mediante reactores PF y PF con dispersión, aun proporcionando peores ajustes, sí permiten realizar una predicción del valor de k que debería utilizarse, ya que ésta está es en todos los casos de un orden de magnitud semejante. Son en todos los casos constantes de valores 10^{-2} .

Otra de las observaciones que realizamos al comparar las modelizaciones según el tamaño de las partículas es que el error cometido en las modelizaciones es mayor cuanto mayor es el rango del diámetro de partículas al que se pretende ajustar los modelos.

Al observar las gráficas de eliminación de partículas según rangos, es evidente que cuando hablamos de tamaños grandes de partículas, la práctica totalidad de la eliminación se da al inicio del humedal, como muestra la Figura 5.33 a modo de ejemplo. Este fenómeno ha sido observado anteriormente cuando se ha estudiado la eliminación y evolución de las partículas.

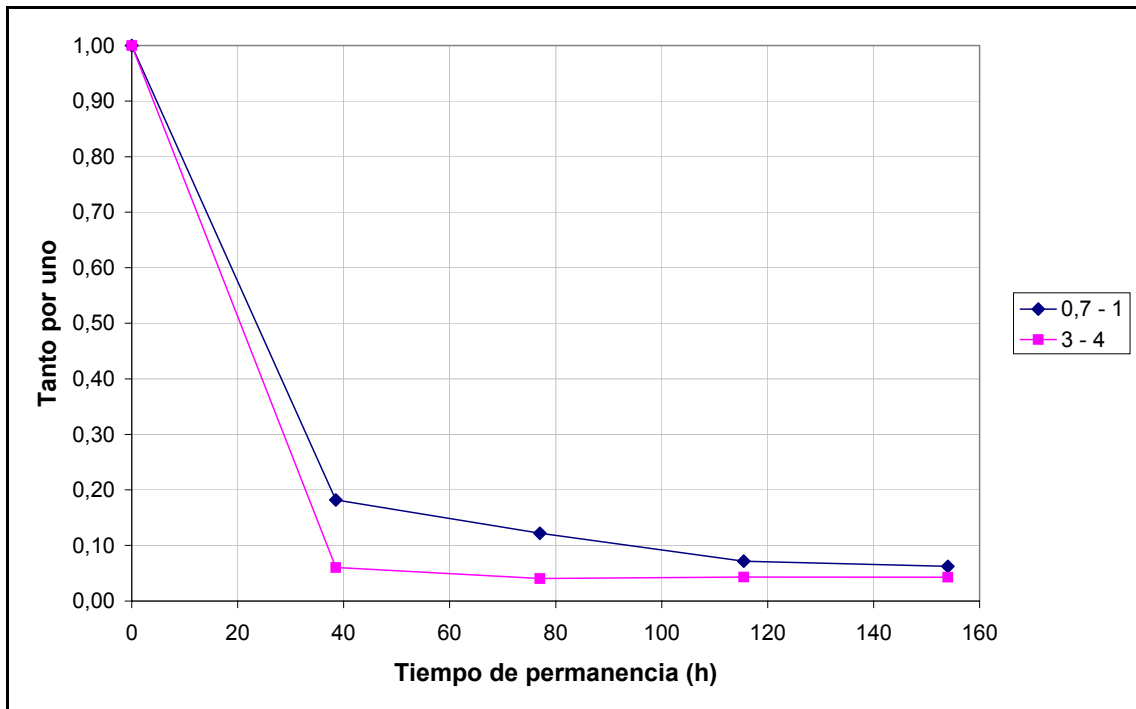


Figura 5.33: Comparación de la eliminación de partículas según rangos, para la campaña realizada en junio en el humedal C2.

Todos los modelos con los que se está modelizando la eliminación de partículas son modelos de primer orden, es decir, modelos cuya constante de eliminación k sigue una ecuación del tipo:

$$\frac{dN}{dt} = -kN$$

Sin embargo la forma de la eliminación de partículas de gran tamaño sugiere que la modelización debería realizarse con modelos de orden cero, del tipo:

$$\frac{dN}{dt} = -k$$

Estos modelos indican que la eliminación de partículas no depende de la cantidad de ellas que haya en el afluente, ni de cómo evolucione su concentración a lo largo del humedal. La eliminación se produce en su totalidad al inicio del recorrido y después se anula.

No resulta lógico intentar obtener las constantes que rigen estos modelos de orden cero con los datos de que se dispone en el presente estudio. Tan solo se dispone de un punto en cada muestra para ello, y no es posible aventurar si el tramo donde se produce esta eliminación inicial de partículas es de longitud similar a la distancia entre el inicio del humedal y nuestro primer punto de muestreo P1. Si en realidad esta distancia fuera menor, se estaría subestimando los valores de las constantes de eliminación inicial de las partículas de gran tamaño.

En los casos del número total de partículas y de partículas de tamaños entre 0,7 y 1 μm , parece lógico intentar una modelización de primer orden, con los modelos que se han probado hasta ahora.

Sin embargo resulta lógico pensar que el motivo por el que el número total de partículas sufre una eliminación de características similares a la de las partículas pequeñas (0,7-1 μm) es consecuencia de que éstas son en proporción mucho más importantes que las partículas de diámetros mayores. Es decir, es la presencia de este tipo de partículas la que hace evolucionar al número total de ellas siguiendo tendencias de primer orden y no de orden cero.

Por este motivo en lo sucesivo se procede a realizar la modelización cinética tan solo de las partículas de menor tamaño. Se ha vuelto a realizar una división en rangos. En este caso se han escogido los rangos que subdividen a este grupo de partículas en tamaños entre 0,7 y 0,8 μm , 0,8 y 0,9 μm , y 0,9 y 1 μm .

Modelización cinética de partículas entre 0,7 y 1 μm

En una primera aproximación se procedió a un ajuste similar al que se hizo a los rangos de partículas anteriormente explicados.

Para el caso de la modelización mediante un reactor de flujo en pistón, los valores de las constantes cinéticas y los errores obtenidos se resumen en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13: Valores de K y errores para la modelización cinética mediante PF para partículas pequeñas, según campaña y humedal, y valores medios.

Humedal	Campaña	0,7-0,8 μm		0,8-0,9 μm		0,9- 1 μm	
		K_{PF}	Error	K_{PF}	Error	K_{PF}	Error
C2	Junio	0,05	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06
	Julio	0,03	0,18	0,04	0,11	0,05	0,08
	Agosto	0,03	0,10	0,04	0,07	0,04	0,09
	Diciembre	0,04	0,17	0,04	0,16	0,05	0,12
	Valor medio	0,04	0,13	0,04	0,10	0,05	0,09
D2	Junio	0,07	0,12	0,07	0,10	0,08	0,07
	Diciembre	0,12	0,05	0,12	0,05	0,11	0,03
	Valor medio	0,10	0,08	0,10	0,07	0,10	0,05

En el caso del flujo en pistón con retardo, los valores obtenidos son los que muestra la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Valores de K , R y errores para la modelización cinética mediante PF con retardo para partículas pequeñas, según campaña y humedal, y valores medios.

Hum. C2 Campaña	0,7-0,8 μm			0,8-0,9 μm			0,9- 1 μm		
	K_{PFR}	R	E	K_{PFR}	R	E	K_{PFR}	R	E
Junio	1,87E-01	2,20E-01	0,05	1,11E-01	6,74E-02	0,01	6,97E-02	6,89E-03	0,05
Julio	7,30E+00	3,21E+01	0,07	1,08E-01	9,70E-02	0,02	7,48E-02	2,03E-02	0,07
Agosto	2,41E+27	6,34E+28	0,09	6,13E+41	1,72E+43	0,09	1,27E-01	9,50E-02	0,04
Diciembre	4,92E-01	1,08E+00	0,03	4,04E+02	2,32E+03	0,03	6,83E+09	6,41E+10	0,09
Valor medio	6,04E+26	1,58E+28	0,06	1,53E+41	4,31E+42	0,04	1,71E+09	1,60E+10	0,06
Hum. D2 Campaña	0,7-0,8 μm			0,8-0,9 μm			0,9- 1 μm		
	K_{PFR}	R	E	K_{PFR}	R	E	K_{PFR}	R	E
Junio	0,10	0,07	0,16	0,08	0,03	0,14	0,05	0,01	0,14
Diciembre	1,02	1,38	0,03	6,51	13,71	0,03	0,26	0,17	0,03
Valor medio	0,56	0,72	0,09	3,30	6,87	0,09	0,16	0,08	0,08

Puede verse que al igual que en las partículas grandes, en el caso de las partículas pequeñas los valores del coeficiente de retardo y la constante de eliminación cinética sufren una gran dispersión. Por este motivo no se puede establecer a partir de las modelizaciones realizadas unos valores de K y R que nos permitan predecir resultados futuros conociendo los datos de entrada de partículas en el humedal.

Por este motivo se ha optado por comprobar cómo son los ajustes con este modelo si se aplican los valores del coeficiente de retardo que se sugieren en la literatura. Como se ha mencionado anteriormente, los valores sugeridos son de 2 a 5 d^{-1} (H.L. Shepherd, 2001). Se ha tomado para el nuevo ajuste un valor de R igual a 3,5 d^{-1} , y se ha cambiado el método de aproximación del ajuste.

Como se explicó en el Capítulo 4, en esta primera aproximación, al tener dos grados de libertad (K y R) se optó por determinar la K que proporcionaba el valor del efluente en cada caso, y la R que, una vez determinada K , permitía un mejor ajuste. En este segundo ajuste, como el valor de R es fijo, se juega tan solo con el valor de la constante de eliminación. Los resultados que se obtienen con este método de ajuste, para $R = 3,5 \text{ d}^{-1}$ se resumen en la Tabla 15.

Tabla 5.15: Valores de K y errores para la modelización cinética mediante PF con retardo de $3,5 \text{ d}^{-1}$ para partículas pequeñas, según campaña y humedal, y valores medios.

Humedal	Campaña	0,7-0,8 μm		0,8-0,9 μm		0,9- 1 μm	
		K_{PFR}	Error	K_{PFR}	Error	K_{PFR}	Error
C2	Junio	1,47	0,08	1,54	0,07	1,67	0,06
	Julio	1,16	0,06	1,41	0,05	1,63	0,06
	Agosto	1,42	0,05	1,65	0,03	1,65	0,02
	Diciembre	1,31	0,02	1,39	0,03	1,52	0,03
	Valor medio	1,34	0,05	1,50	0,05	1,62	0,04
D2	Junio	1,14	0,19	1,21	0,17	1,26	0,16
	Diciembre	2,27	0,02	2,32	0,02	2,38	0,03
	Valor medio	1,71	0,11	1,76	0,10	1,82	0,09

Como puede verse en la Tabla 5.15, en el caso del humedal C2, cuando se prueba la modelización mediante un coeficiente de retardo de valor $3,5 \text{ d}^{-1}$, las constantes de eliminación cinética que se obtienen pertenecen en todo caso a valores entorno a los $1,5 \text{ d}^{-1}$. Los errores cometidos con este método son del orden de los obtenidos con el ajuste anterior.

En el caso del humedal D2, si bien esta convergencia de valores no es tan pronunciada, puede verse como la constante de eliminación se mantiene entre valores de 1 y 2,5, y los errores se mantienen en el mismo rango que anteriormente.

La Tabla 5.16 refleja los valores de K y Los errores obtenidos en el caso de la modelización mediante flujo en pistón con dispersión:

Tabla 5.16: Valores de K y errores para la modelización cinética mediante PF con dispersión para partículas pequeñas, según campaña y humedal, y valores medios.

Humedal	Campaña	0,7-0,8 μm		0,8-0,9 μm		0,9- 1 μm	
		K_{PFD}	Error	K_{PFD}	Error	K_{PFD}	Error
C2	Junio	0,07	0,08	0,07	0,06	0,08	0,06
	Julio	0,04	0,18	0,05	0,10	0,06	0,08
	Agosto	0,04	0,10	0,05	0,07	0,06	0,08
	Diciembre	0,05	0,16	0,06	0,16	0,06	0,11
	Valor medio	0,05	0,13	0,06	0,10	0,07	0,08
D2	Junio	0,08	0,12	0,09	0,10	0,09	0,08
	Diciembre	0,15	0,05	0,19	0,05	0,17	0,03
	Valor medio	0,11	0,09	0,14	0,07	0,13	0,05

Por último se ha hecho el ajuste mediante el modelo de tanques en series con un reactor de flujo en pistón al inicio.

Sin embargo, y una vez observados los problemas que se derivan de los valores de t_{delay} en la modelización mediante tanques en serie, se ha procedido a evaluar los resultados que se obtienen mediante el uso de este modelo con valores de t_{delay} menores.

Valores menores indicarían que en el caso de la eliminación de partículas, es mucho más conveniente asimilar los humedales a un reactor de flujo en pistón menor y tanques en serie mayores. Con el objetivo de ver cuál es el valor de t_{delay} idóneo en este tipo de modelizaciones, se han probado los ajustes variando este valor.

Se resumen en las Tabla 5.17 los errores obtenidos de la variación del parámetro t_{delay} en cada uno de los humedales y campañas.

Tabla 5.17: Errores cometidos en el ajuste con el modelo de tanques en serie en función del parámetro t_{delay} , según humedal, campaña y rango de partículas.

$T_c=107$ Junio C2				$T_c=154$ Julio C2			
Td	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1	Td	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1
99	0,0480	0,0520	0,0653	99	0,0985	0,0893	0,0763
55	0,0325	0,0347	0,0612	60	0,1430	-0,1316	-0,1600
50	0,0282	0,0264	0,0398	55	0,0865	0,0647	0,0445
45	0,0312	0,0261	0,0334	50	0,0910	0,0406	0,0398
40	0,0352	0,0245	0,0294	45	0,0958	0,0387	0,0363
35	0,0418	0,0276	0,0300	40	0,1000	0,0384	0,0340
				35	0,1175	0,0557	0,0447

$T_c=206$ Agosto C2				$T_c=154$ Diciembre C2			
Td	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1	Td	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1
99	0,0594	0,0505	0,0712	99	0,1262	0,1129	0,1033
75	0,0613	0,0343	0,0571	55	0,0499	0,0484	0,0507
70	0,0650	0,0342	0,0561	50	0,0394	0,0442	0,0419
65	0,0685	0,0353	0,0559	45	0,0338	0,0457	0,0350
60	0,0713	0,0371	0,0570	40	0,0356	0,0512	0,0314
55	0,0736	0,0391	0,0572	35	0,0609	0,0774	0,0517
50	0,0790	0,0450	0,0636				

$T_c=60$ Junio D2				$T_c=87$ Diciembre D2			
Td	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1	Td	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1
50	0,0958	0,0847	0,0744	50	0,0324	0,0283	0,0310
40	0,0953	0,0838	0,0746	40	0,0273	0,0301	0,0316
30	0,1028	0,0879	0,0738	30	0,0238	0,0242	0,0312
20	0,1064	0,0805	0,0534	20	0,0280	0,0350	0,0268
15	0,1033	0,0770	0,0511	15	0,0390	0,0427	0,0307
10	0,1198	0,1008	0,0859	10	0,0414	0,0425	0,0314

*Los valores resaltados en color rojo corresponden a errores dados por curvas crecientes, por lo que no se consideran válidos.

En el caso del humedal C2, para el que inicialmente se había tomado un valor de t_{delay} de 99 horas, se aprecia que el menor error se obtiene para valores de t_{delay} de entre 40 y 50 horas en todas las campañas salvo en la correspondiente al mes de agosto. En este mes, el valor que ha dado errores menores ha sido de 70 horas. A la vista de estos resultados se ha optado por tomar para la modelización de este humedal un valor de t_{delay} de 45 horas.

En el caso del humedal D2, para el que habíamos tomado inicialmente un valor de 50 horas para el parámetro t_{delay} , se observa que el mínimo error se obtiene para valores de entre 15 horas en la campaña de junio, y de 20 horas en la campaña de diciembre. Se ha optado por tomar un valor de t_{delay} de 20 horas para hacer la modelización, puesto que el error aumenta menos en el caso de aumentar en 5 horas el t_{delay} óptimo de junio que si se reduce de 20 a 15 horas en el caso de diciembre.

De este modo, tomando los valores $t_{\text{delay}} = 45$ horas en el humedal C2 y $t_{\text{delay}} = 20$ horas en el humedal D2, las constantes cinéticas y errores obtenidos son los que se muestran en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18: Valores de K y errores para la modelización cinética mediante CST para partículas pequeñas, según campaña y humedal, y valores medios. [$t_{\text{delay}}(\text{C2}) = 45$ horas, $t_{\text{delay}}(\text{D2}) = 20$ horas]

Humedal	Campaña	0,7-0,8 μm		0,8-0,9 μm		0,9- 1 μm	
		K_{PFD}	Error	K_{PFD}	Error	K_{PFD}	Error
C2	Junio	-0,03	0,08	-0,03	0,06	-0,04	0,06
	Julio	-0,04	0,18	-0,05	0,10	-0,06	0,08
	Agosto	-0,13	0,10	-0,11	0,07	-0,14	0,08
	Diciembre	-0,02	0,16	-0,01	0,16	-0,03	0,11
	Valor medio	-0,05	0,13	-0,05	0,10	-0,07	0,08
D2	Junio	-0,41	0,12	-0,52	0,10	-0,63	0,08
	Diciembre	-0,18	0,05	-0,19	0,05	-0,52	0,03
	Valor medio	-0,29	0,09	-0,35	0,07	-0,57	0,05

Una vez se ha obtenido para cada método el mejor ajuste posible, se presenta un resumen de los resultados en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Resumen de resultados para cada una de las modelizaciones, según humedal.

Humed.	Modelo	0,7-0,8 μm			0,8-0,9 μm			0,9- 1 μm		
		K	S^2	ϵ	K	S^2	ϵ	K	S^2	ϵ
C2	PF	0,04	7,50E-05	0,14	0,04	1,00E-04	0,16	0,05	5,00E-05	0,10
	PFR	1,34	1,42E-02	0,08	1,50	1,11E-02	0,07	1,62	3,38E-03	0,05
	PFD	0,05	1,42E-02	0,13	0,06	7,50E-05	0,14	0,07	1,00E-04	0,06
	CST	-0,05	1,50E-04	0,10	-0,05	1,40E-03	0,10	-0,07	1,88E-03	0,09
D2	PF	0,10	3,25E-04	0,10	0,10	3,25E-04	0,10	0,10	1,25E-04	0,09
	PFR	1,71	1,60E-01	0,17	1,76	1,54E-01	0,16	1,82	3,38E-03	0,15
	PFD	0,11	6,25E-04	0,13	0,06	1,25E-03	0,24	0,13	8,00E-04	0,19
	CST	-0,29	6,63E-03	0,09	-0,35	1,36E-02	0,08	-0,57	1,53E-03	0,09

Las constantes de dispersión (K) contenidas en la Tabla 5.19 son las medias en cada caso. El error que se representa es la media del error obtenido para cada muestreo y cada modelización cuando se intenta el ajuste con esta K media. Como medida de fiabilidad de esta constante se ha calculado la dispersión de los valores de K obtenidos para realizar esta media. La medida de dispersión utilizada es la varianza (S^2).

Puede apreciarse como las modelizaciones con que se obtienen los dos mejores ajustes en cuanto a errores son las correspondientes a los modelos PFR y CST. Los errores obtenidos para ambas están en un rango comprendido entre 0,05 y 0,1 en todos los casos. Estos modelos son los dos modelos biparámetro con los que hemos trabajado. En anteriores publicaciones (Shepherd, 2001) ya se apuntaba al hecho de que, previsiblemente, este tipo de modelos deben ser los que mejor reproduzcan el comportamiento real de los humedales, puesto que se cuenta con dos variables para simularlo.

Cuando se observa la varianza de las constantes obtenidas en el ajuste óptimo de cada muestreo para estos dos modelos, se aprecia que ésta es sensiblemente menor en casi todos los casos para el modelo CST. Esto nos indica que el rango de constantes que procuran un mejor ajuste es más pequeño. Esto puede indicar que una desviación del valor de la constante de eliminación óptima en este modelo derivaría en incrementos del error mayores que si se produce una ésta misma desviación en el modelo PFR.

Concluimos por tanto que los dos modelos que modelizan mejor la eliminación de partículas en los nuestros humedales son el modelo de flujo en pistón con retardo, para un valor del retardo de $3,5 \text{ d}^{-1}$, y el modelo de tanques en serie con un reactor de flujo en pistón con t_{delay} de 45 horas para el humedal C2, y de 20 horas en el humedal D2.

Es interesante comprobar como, a pesar de que la constante de eliminación cinética para los rangos de partículas escogidos se mantiene dentro de un mismo rango ($1,3 \div 1,5 \text{ d}^{-1}$ en el modelo PFR y $-0,04 \div -0,08 \text{ d}^{-1}$ en el modelo CST), ésta va aumentando a medida que el tamaño de partículas es mayor. Esto indica que las partículas mayores se eliminan más rápidamente.