

Resumen

Se estudia el efecto que los vertidos ácidos y básicos tienen sobre los microorganismos existentes en el reactor de fangos activados. Dicho efecto se ha seguido a través de los parámetros clásicos de control (SVS y porcentaje de eliminación de materia orgánica) y por las medidas de actividad de los microorganismos (tasa específica de respiración y porcentaje de células activas). Los resultados obtenidos indican que para los pH más extremos (pH 4.5 y pH 10.5) la microbiota se ve afectada, empeorando el funcionamiento del sistema y por lo tanto, la calidad del efluente que no cumple con la Directiva Europea 91/271/CBE. En los ensayos realizados a pH 6 y 9, aunque inicialmente los microorganismos disminuyen su actividad, el sistema logra recuperarse y volver a unos niveles de actividad similares a los anteriores al ensayo. También se ha comprobado que desviaciones hacia pH ácidos de la alimentación tienen un mayor efecto negativo en el reactor que idénticas desviaciones del pH hacia la basicidad.

Palabras clave:

Vertidos ácidos y básicos, sistema de fangos activados, microorganismos, SVS, materia orgánica, respiración, células activas.

Abstract**The influence of acid and base waste on the activated sludge system**

A study has been made of the effect of acid and base waste on the microorganisms in the activated sludge reactor. This effect was monitored using the classical control parameters (SVS and the percentage of organic matter eliminated) and by measuring the activity of the microorganisms (specific breathing rate and percentage of active cells). The results obtained indicate that the microbiota is affected at the extremes of the pH range (pH 4.5 and pH 10.5). The system's performance worsens and therefore the quality of the effluent fails to comply with European Directive 91/271/EEC. In the tests carried out with pH 6 and 9, the microorganisms' activity declined at first, but the system eventually recovered and returned to levels of activity similar to those prior to the test. It was also found that deviations of the supply towards acid pH had a greater negative effect on the reactor than identical deviations towards basicness.

Keywords:

Acid and base waste, activated sludge system, microorganisms, organic matter, breathing, active cells.

Influencia de vertidos ácidos y básicos sobre el sistema de fangos activados

Por: Coello Oviedo, M^a. D. ; Sales Márquez, D. ; Quiroga Alonso, J. M^a.

Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnología del Medio Ambiente
Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz
Polígono Río San Pedro
Apartado 40
11510 Puerto Real (Cádiz)

1. Introducción

El sistema de fangos activados constituye el proceso más utilizado para la reducción de la materia orgánica disuelta y coloidal presente en las aguas residuales. Se trata de un tratamiento biológico, el cual utiliza las reacciones metabólicas de los microorganismos para eliminar determinadas sustancias que tienen una demanda de oxígeno. Normalmente, el oxígeno en forma de aire es introducido mediante difusores o turbinas en el tanque de aireación o reactor biológico, donde se genera el proceso básico de fangos activados, en el que la materia orgánica, presente en el agua residual, es utilizada para el crecimiento celular de los microorganismos que se han desarrollado formando flóculos biológicos, siendo convertida en tejido celular y productos finales oxidados (CO₂ y H₂O principalmente) (Metcalf & Eddy, 1991).

Este tratamiento constituye el auténtico corazón de los sistemas de depuración, de tal forma que un porcentaje notable de los gastos de

mantenimiento y explotación de la planta son debidos a él. Se necesita por tanto, disponer de la máxima información sobre las características de los vertidos que alteren su funcionamiento, para buscar las medidas que minimicen los efectos.

Entre los vertidos procedentes de comunidades e industrias que pueden recibir los colectores municipales y que afectan al proceso de "fangos activados" están los vertidos con pH ácidos y básicos, que son consecuencia de las negligencias en algunos procesos de limpieza de depósitos de combustible para calefacciones, tratamientos de superficies metálicas con ácidos inorgánicos fuertes, vaciado de baterías eléctricas, etc. (Corral *et al.*, 1994).

Este tipo de vertidos afectan de forma importante a los microorganismos presentes en los sistemas biológicos de las EDARs, produciendo en muchos casos la pérdida total de su capacidad depuradora, ya que el pH del medio externo tiene un acusado efecto sobre la estructura y la permeabilidad de la pared celular.

Aunque hay muchas excepciones, la mayoría de las especies bacterianas tienen un óptimo de crecimiento cerca de valores de pH neutros, mientras que el máximo y mínimo de crecimiento se encuentra entre pH de 5 y 9. A pesar de la importancia que esta variable posee sobre el sistema de fangos activados, no se han encontrado muchas referencias en la amplia bibliografía consultada sobre el efecto que el pH de las aguas residuales tiene en el funcionamiento del sistema biológico y menos aún sobre la actividad de los microorganismos presentes en el mismo.

Es necesario por tanto, conocer el efecto del pH para la explotación óptima de este sistema. El presente trabajo muestra el comportamiento tanto del proceso de fangos activados como de la actividad biológica de los microorganismos presentes en los mismos frente a vertidos con pH ácidos y básicos.

2. Material y métodos

La planta piloto utilizada en el estudio se muestra en la **Figura 1**, la cual está completada con una bomba dosificadora de la alimentación y un compresor que suministra el aire necesario para la aireación y para la bomba de recirculación, así como los correspondientes depósitos para el influente y el efluente. Las características técnicas de la planta piloto a escala de laboratorio y modo de

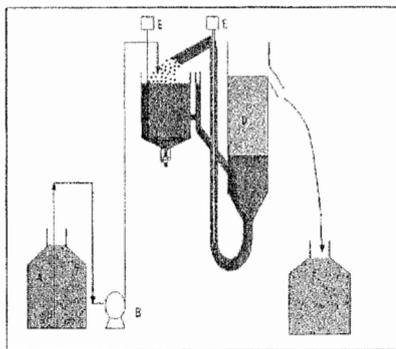


Figura 1. Esquema de la unidad de lodos activos a escala de laboratorio utilizada en la realización de los ensayos. A. Recipiente de almacenamiento del influente. B. Bomba dosificadora. C. Tanque de aireación. D. Decantador. E. Bombas de aire comprimido. F. Recipiente de recogida del efluente.

Volumen cuba de aireación	3 l
Volumen decantador	2,5 l
THR	3 h
Caudal de alimentación	6600 ml/h
Edad de lodos	10 d

Tabla 1. Características técnicas de la planta piloto

operación aparecen recogidas en la **Tabla 1**.

El tiempo de duración de cada uno de los ensayos realizados ha sido de 8 días. Diariamente y operando en continuo, la unidad de fangos activados recibía el agua residual al pH de trabajo de cada experimento.

Los parámetros seleccionados como indicadores del funcionamiento del sistema fueron el pH, el cual fue seguido mediante la utilización de un pHmetro Ingold 104023311, la concentración de biomasa (seguida a través de la medida de los sólidos volátiles en suspensión), la demanda química de oxígeno (DQO). Estos dos últimos fueron analizados de acuerdo con los Métodos Normalizados (APHA-AWWA-WPCF, 1991).

La actividad microbiana existente en el reactor se siguió a través de recuentos de poblaciones total y activa, y por la medida de la tasa específica de respiración (SOUR) (APHA-AWWA-WPCF, 1991).

Para la determinación del número de células activas y totales se siguió el protocolo propuesto por Griebel et al, 1997. Los datos se expresan como porcentaje de células activas debido a la mayor representatividad de los mismos.

Para la determinación de la tasa específica de respiración se siguió las instrucciones de los Métodos Normalizados (APHA-AWWA-WPCF, 1991).

Además, se realizó una identificación de los microorganismos presentes en el sistema a lo largo de cada uno de los ensayos. Para lo cual fue necesario realizar observacio-

nes al microscopio óptico. Las muestras se tomaron con una micropipeta, utilizando el objetivo de x100 para el recuento de ciliados y metazoos y el objetivo de x400 para el grupo de flagelados. Los ciliados se identificaron siguiendo las claves de Curds (1982) y Curds *et al.* (1983). Otros protozoos se identificaron utilizando las claves de Baldwin and Chandler (1966) y Lee *et al.* (1985).

3. Resultados y discusión

3.1. Modo de operación

La unidad de fangos activados de laboratorio fue inoculada con las muestras de fangos activados procedentes del tanque de aireación de la EDAR de Jerez de la Frontera hasta llegar a un estado estacionario, el cual se consideró alcanzado cuando el rendimiento en la eliminación de la DQO era de $85 \pm 2\%$. A continuación se le añadió la alimentación con el pH del estudio. El agua residual utilizada diariamente como alimentación del reactor en los diferentes experimentos procedía de la salida del decantador primario, y mediante la adición de un ácido (ácido fosfórico) o base (hidróxido sódico) se llevaba al pH del ensayo.

3.2. Ensayos a pH básicos

pH=9

Los resultados obtenidos en la variable sólidos volátiles en suspensión (SVS) no parecen estar afectados por el carácter básico de la alimentación. Se produce un pequeño descenso, entre los días 3 y 4, pero rápidamente el valor de la variable se recupera y vuelve a los valores iniciales (**Figura 2**). Este mismo comportamiento presenta el porcentaje de eliminación de la DQO que se alcanzan a lo largo del ensayo (**Figura 3**), registrándose sólo una pérdida del 2.8 % en la eficacia de la depuración al final del experimento, y estando los valores absolutos de DQO del efluente dentro de los permitidos por la Legislación vigente.

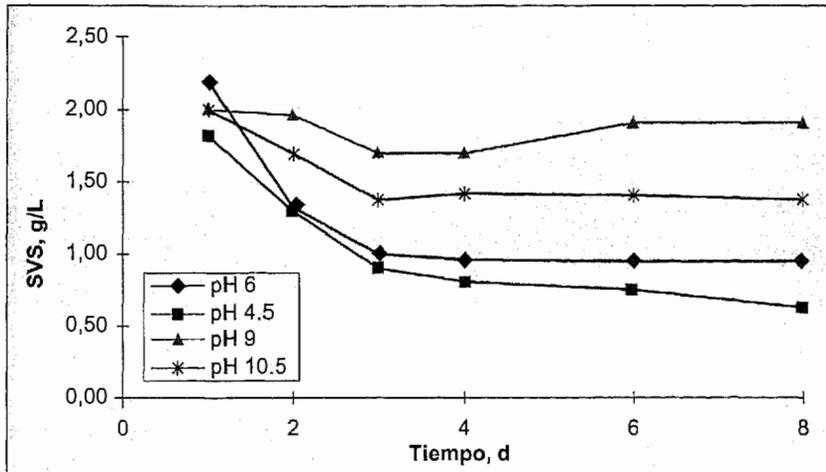


Figura 2. Comportamiento de la variable SVS frente a aguas residuales a diferente pH.

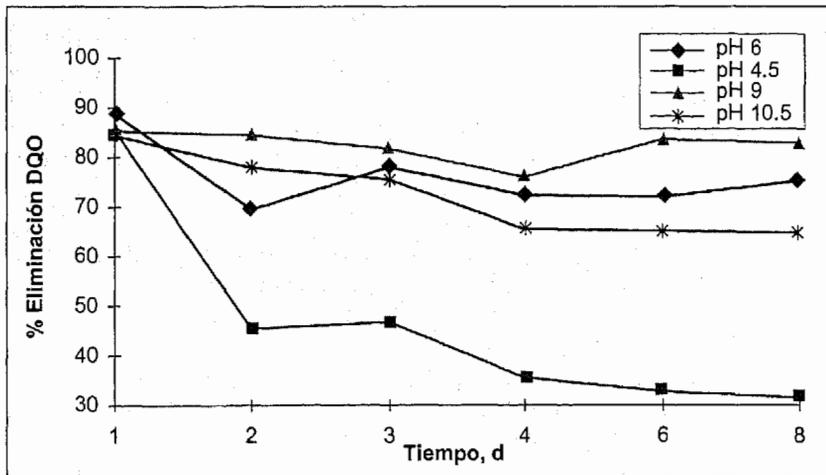


Figura 3. Efecto del pH del agua residual sobre los porcentajes de eliminación de DQO alcanzados

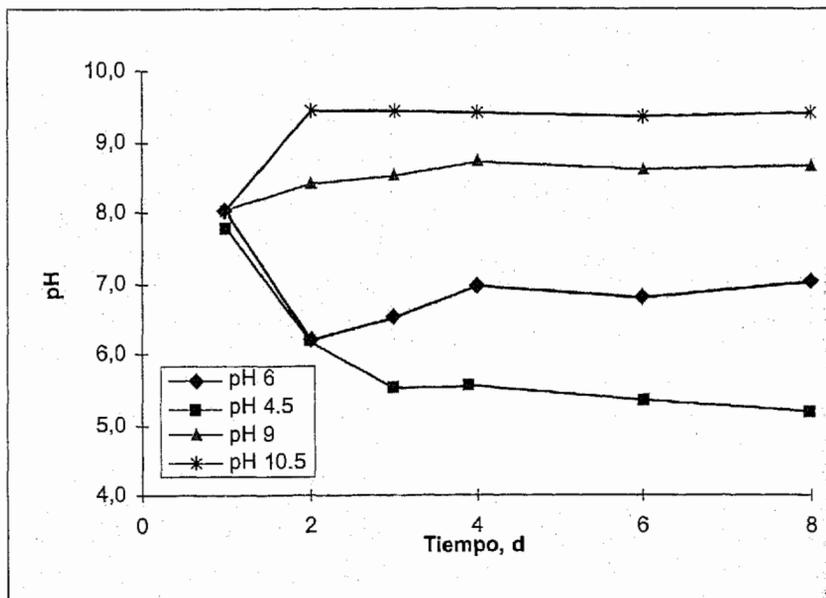


Figura 4. Tendencia del pH del efluente en los diferentes ensayos realizados.

El pH del efluente, cómo es lógico, está influenciado por el pH de la alimentación. Como se puede observar en la **Figura 4**, en los cuatro primeros días el pH mantiene una tendencia ascendente, pasando desde valores iniciales de 8.0 hasta un pH de 8.7 el 4º día cuarto del ensayo. Dicho valor se mantiene hasta el final del experimento. Esta estabilización parece indicar la aparición de algún sistema de regulación del pH en la propia unidad de fangos activados.

Por lo que se refiere a las variables que muestran la actividad microbiana, al observar las **Figuras 5** y **6**, se puede comprobar que tienen un comportamiento análogo a las variables de control, (sólidos volátiles en suspensión y porcentaje de eliminación de DQO). Así, la tasa específica de respiración (SOUR) (**Figura 5**) experimenta un descenso en los primeros días del ensayo, llegando a su valor mínimo el día tercero ($282.58 \text{ mgO}_2/\text{gSVS}\cdot\text{d}$). A partir de este momento, los valores de SOUR se recuperan y vuelven a alcanzar los conseguidos en el inicio del ensayo.

La evolución seguida por la variable porcentaje de células activas presentes en el reactor durante el ensayo (**Figura 6**), es muy similar a las descritas anteriormente: un descenso durante los días de inicio del ensayo, para a continuación estabilizarse llegando a alcanzar valores similares a los registrados al inicio del ensayo.

Estos resultados analíticos están apoyados por las observaciones que se realizaron al microscopio, los cuales, los cuales permitieron detectar cómo a partir del día 2 de ensayo comienza a producirse una disminución de gran parte de los protozoos presentes en el tanque de aireación, la cual se va incrementando conforme transcurre el ensayo, provocando una disminución de la actividad microbiana del reactor. También, el descenso de los sólidos en suspensión comentado anteriormente puede explicarse por la elimi-

nación de los microorganismos, y por no producirse fenómenos de reproducción. Esta situación es temporal ya que a partir del cuarto día se pudo observar como tiene lugar una lenta recuperación de los individuos presentes en el sistema, volviendo a aparecer ciliados sésiles individuales, en estadio de telotroco, llegando a existir al final del ensayo una microbiota totalmente recuperada ya que a medida que el reactor evoluciona y se produce una aclimatación del mismo.

Los resultados obtenidos en este experimento permiten concluir que los vertidos con un ligero carácter básico, pH 9, no parecen tener efectos negativos definitivos sobre el sistema de fangos activados. Los ligeros descensos en los porcentajes de depuración alcanzados, así como en las medidas de actividad realizadas, son debidos, probablemente, a una adaptación al carácter básico del agua residual que está llegando a la planta, ya que las variables analizadas parecen recuperarse y mostrar valores muy similares a los registrados al inicio del ensayo. Además el efluente que se obtiene a lo largo del ensayo cumple con la legislación actual.

pH= 10.5

Para el ensayo realizado a pH=10.5 los resultados que se obtuvieron fueron diferentes a los mostrados anteriormente (pH=9). En las variables de control (SVS y porcentaje de eliminación de DQO) se observa un descenso continuado desde el inicio del experimento hasta el final del mismo, produciéndose una pérdida de eficacia de la depuración superior al 23 % y pérdida en el valor de los SVS del 31 % (Figuras 2 y 3 respectivamente). Estas pérdidas harían que si el efluente de la EDAR fuera vertido a un cauce receptor, éste no cumpliría la normativa vigente.

Las medidas de actividad muestran igualmente el efecto negativo que el vertido a pH 10.5 tiene sobre el sistema de fangos activados. La

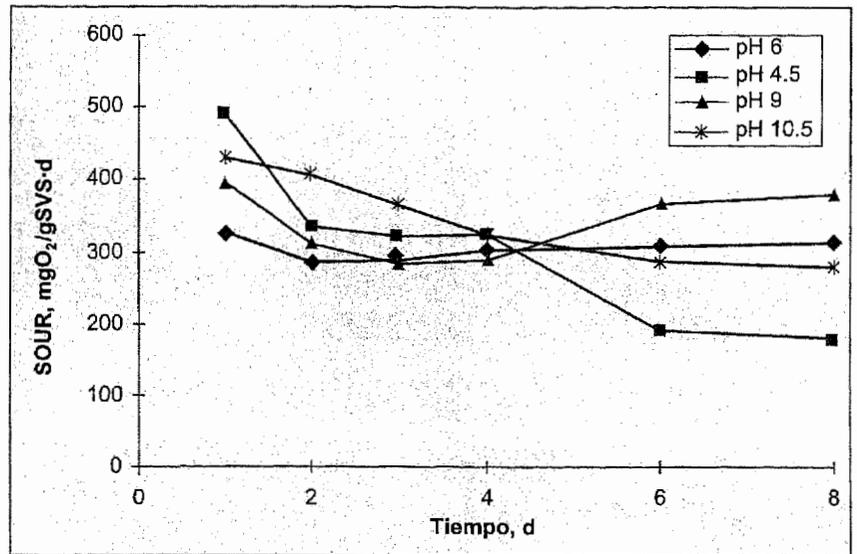


Figura 5. Efecto del pH del influente sobre la tasa específica de respiración del sistema de lodos activos.

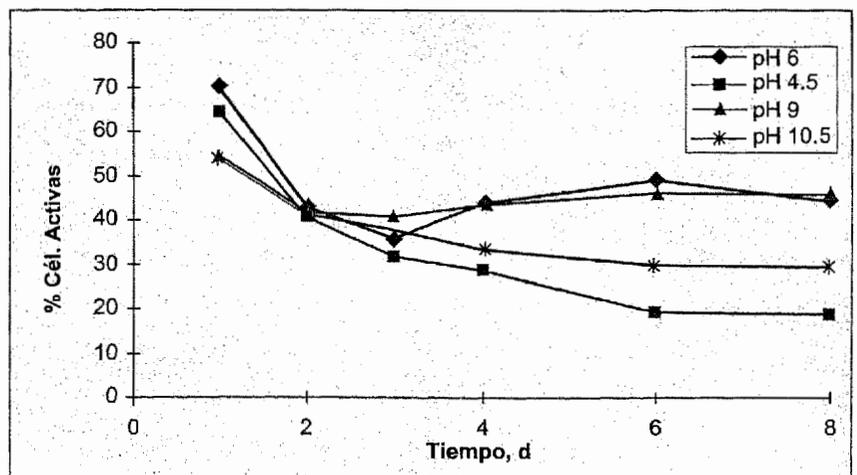


Figura 6. Tendencia de la población activa del sistema de lodos activos frente a aguas residuales de diferentes pH.

tasa específica de respiración (Figura 5) experimenta un descenso desde un valor de 432 mgO₂/gSVS·d hasta un valor de 280.35 mgO₂/gSVS·d, lo que supone una pérdida en la actividad respiratoria del 35 %. De mismo modo, el número de células activas presentes en el reactor (Figura 6) se ve afectado por el vertido ya que varía desde el 54 % inicial al 29.35 % de población activa al final del mismo.

Las observaciones diarias al microscopio permitieron comprobar la importante eliminación que estaba produciéndose de los microorganismos superiores durante los primeros días del ensayo. Durante este perio-

do apenas si aparecen ciliados sésiles y arrastreros, quedando como ejemplares del grupo de los protozoos, individuos pertenecientes a las especies de Litonotus, Chilodonella, etc, y algún pequeño flagelado. Esto origina que la floculación no sea demasiado buena y que exista una pérdida de sólidos biológicos por el efluente, lo que explica el descenso de los sólidos que se produce en los primeros días del ensayo.

Los resultados obtenidos a pH 10.5 permiten concluir que a la vez que se produce una basificación del medio, tiene lugar una disminución de los porcentajes de eliminación de DQO que se alcanzan, provocados

probablemente por una inhibición de la microbiota ante las nuevas condiciones creadas en el reactor.

3.3. Ensayos a pH ácidos

En los experimentos realizados a pH ácidos la forma de operación fue idéntica a la de los ensayos a pH básicos, con la salvedad de que la alimentación a la unidad de fangos activados a escala de laboratorio fue llevado a pH ácido mediante la adición de ácido ortofosfórico (85%). La razón de utilizar este ácido se debe a que es el que presenta una menor interferencia en la acción de los microorganismos (referencia). Los pH de ensayo fueron 6 y 4.5.

pH= 6

Para los sólidos volátiles en suspensión, como se puede observar en la **Figura 2**, se produce un brusco descenso en los días primeros del ensayo en los que llegan alcanzarse pérdidas de más del 50 % de los SVS presentes en el reactor, mostrándose a continuación una estabilización del valor de dicho parámetro. Este descenso es provocado por una disminución del número de individuos presentes en el sistema, lo cual es confirmado por los resultados obtenidos en los recuentos de células totales realizados con el uso del fluorocromo DAPI, que experimentan una reducción del 25 %.

Esta disminución de la población provoca un brusco descenso en los porcentajes de depuración (**Figura 3**), llegándose a producir una pérdida de la eficacia depurativa del 20 % durante los primeros días. Después de este descenso se produce una recuperación del sistema hasta el final del ensayo, aunque siempre por debajo de los niveles alcanzados inicialmente. En este caso, los valores de porcentajes de eliminación de DQO del efluente sí cumplen lo establecido por la Directiva Europea 91/271 (a excepción del día dos de ensayo en el cual el porcentaje de eliminación de DQO alcanzó tan sólo el 69 %), por lo que su vertido podría ser realizado al cauce receptor

sin presentar problemas. Destacar, que las pérdidas de sólidos volátiles en suspensión en el reactor y la disminución de los porcentajes de eliminación en valores de DQO que se producen en este ensayo son superiores a las producidas en el ensayo realizado a pH 9.

La evolución del pH en el efluente a lo largo del ensayo realizado (**Figura 4**), muestra como durante los tres primeros días el pH adquiere un ligero carácter ácido, similar al que presenta la alimentación. Sin embargo, y a medida que transcurre el experimento, el pH del efluente evoluciona hacia valores neutros. Esta respuesta puede ser debida al efecto del pH sobre la población microbiana, lo que ratifica el descenso de los sólidos en suspensión. Una vez que la población comienza a adaptarse se producen mecanismos de corrección del pH del medio como consecuencia de la liberación de CO_2 al medio por los procesos de respiración y la formación del tampón $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$.

Las medidas realizadas de la tasa específica de respiración (**Figura 5**) mostraron un comportamiento diferente al descrito para las variables control (SVS y % eliminación DQO). En los tres días primeros de realización del ensayo, tiene lugar un ligero descenso de la actividad respiratoria de los microorganismos presentes en el sistema. Posteriormente los microorganismos experimentan una adaptación a las características ácidas del vertido, tal y como lo demuestra el aumento del valor de la tasa específica de respiración hasta alcanzar niveles similares a los iniciales.

El porcentaje de reducción de la población activa, registra un acusado descenso al tercer día de ensayo (35%), lo que representa casi la mitad de las que había inicialmente. Posteriormente el valor de la variable se recupera ligeramente, estabilizándose en torno a un valor del 45% al final del ensayo.

A partir de los resultados obtenidos se comprueba que la llegada a

una unidad de fangos activados de un agua residual a pH 6, aunque tiene consecuencias negativas en el sistema, éstas no son muy acusadas ya que los microorganismos son capaces de adaptarse a las nuevas condiciones ambientales creadas en el sistema y recuperar su funcionamiento, aunque éste no sea en el nivel óptimo. Sin embargo, sus efectos son mayores que los registrados a pH ligeramente básicos (pH 9).

pH= 4.5

A la vista de los resultados anteriores, los ensayos realizados a pH 4.5 tuvieron como objetivo comprobar si pH ácidos provocaban la inhibición de la población presente en el sistema. En la **Figura 2** aparecen representados la evolución los sólidos volátiles en suspensión durante el ensayo. Se observa el importante descenso provocado en esta variable debido probablemente a la pérdida de biomasa que está teniendo lugar por el efluente. En los controles al microscopio se pudo observar que al inicio del ensayo en la microbiota de los fangos activados se encontraron individuos de todos los grupos más importantes. A medida que el agua residual de carácter ácido comenzó a llegar al reactor, la microbiota se vio fuertemente afectada, produciéndose la defloculación y pérdida de una cantidad elevada de biomasa por el efluente. Además, se observó una inhibición en la microfauna presente en el sistema, afectando en primer lugar a los microorganismos superiores por ser los más sensibles. En este caso particular los primeros en desaparecer fueron los ciliados sésiles coloniales y los arrastreros, principalmente afecta a *Euplotes sp.* y *Aspidisca cicada*, quedando individuos pertenecientes a los grupos funcionales de los ciliados libres nadadores y flagelados. Posteriormente se observa que el vertido ácido afecta también a los microorganismos que han soportado durante más tiempo las condiciones ambientales ácidas del reactor, apareciendo los flóculos

al final del ensayo prácticamente desiertos de protozoos.

Los porcentajes de eliminación de materia orgánica presentan esta misma tendencia decreciente durante los días que se desarrolla el experimento: Esto es debido a la pérdida de biomasa por el efluente y a la inhibición que experimentan los microorganismos presentes en el reactor, llegándose a producir una pérdida en la calidad del efluente y en la eficacia depurativa del sistema de hasta un 65%.

Coincidiendo con la disminución que experimentan tanto la concentración de sólidos volátiles en suspensión como los porcentajes de eliminación de materia orgánica alcanzados, el pH del efluente desciende, llegándose al final del mismo a un valor de 5.2. Este valor de pH dificulta el desarrollo y la supervivencia de los microorganismos presentes en la unidad de fangos activados.

Los resultados de las medidas de actividad han sido útiles para confirmar la inhibición microbiana que tiene lugar en el reactor. Los valores de la tasa específica de respiración corroboran también la inhibición de los microorganismos presentes en el sistema (Figura 5), así como el experimentado por la población activa presente en el reactor, llegando al final del ensayo a encontrarse activa tan solo el 18.5 % del total de la población, lo ha supuesto una reducción de más del 70 %.

En este caso no se produce adaptación alguna a las características del vertido, llegándose a producir durante los ocho días que dura el ensayo una destrucción casi total de la población presente en el sistema, lo que provoca una disminución de todas las variables estudiadas durante la realización del mismo.

4. Conclusiones

El mecanismo por el cual el pH afecta al crecimiento de los microorganismos no está bien conocido. Una explicación obvia podría estar en el efecto del pH sobre la activi-

dad enzimática. También parece razonable pensar que el efecto del pH sobre el transporte de materiales a través de la membrana sea un factor importante y determinante sobre el crecimiento. El pH del medio puede determinar el estado de ionización de los nutrientes requeridos por la célula y la forma que adquieren estos compuestos, los cuales pueden resultar tóxicos para la propia célula. Se confirma así pues la necesidad de realizar un ajuste inicial de pH hasta valores cercanos a la neutralidad de las aguas residuales industriales para que los tratamientos biológicos sean satisfactorios. No obstante y a partir de los resultados obtenidos se puede concluir:

Los resultados más negativos se han obtenido en los ensayos realizados a pH extremos (pH 4.5 y pH 10.5) debido a que los microorganismos no son capaces de tolerarlos, y es por esto por los que se produce la desestabilización del sistema y una pérdida en el funcionamiento de éste.

En los ensayos que se realizaron más cerca de pH óptimo de crecimiento, pH 6 y pH 9, aunque parece que en primer lugar el cambio de las condiciones ambientales afecta a los microorganismos presentes en sistema, estos son capaces de adaptarse, a través del propio mecanismo tamponador de la microbiota existente en el reactor.

Desviaciones hacia pH ácidos de la alimentación tienen mayores efectos negativos en el funcionamiento del sistema de fangos activados, que idénticas desviaciones hacia la basicidad.

5. Bibliografía

[1] APHA; AWWA; WPCF (1989). "Métodos Normalizados. Para el análisis de aguas potables y residuales". Editorial Díaz de Santos, S. A., Edición en español (1990).

[2] BALDWIN, H. AND CHANDLER, G. (1966). *Freshwater Biology*. Edmonson, Washington, D.C.

[3] CURDS C. R. (1982). *British and other freshwater Ciliated Pro-*

tozoa. Part I. Cambridge University Press, London.

[4] CORRAL, A; COSTA C Y MARTIN J.L. (1994). Comportamiento de una planta de fangos activados frente a vertidos ácidos. *Tecnología del Agua* 126, 13-18.

[5] CURDS, C.R. (1966). An ecological study of the ciliated protozoa in activated sludge. *Okios*, 15, 282-9

[6] CURDS, C.R., GATES, M.A. AND ROBERTS, D. MCL. (1983). *British and other freshwater Ciliated Protozoa. Part II*. Cambridge University Press, London.

[7] FROLUND, B.; GRIEBE, T.; NIELSEN, P.H. (1995). Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix. *Appl. Microbiol Biotechnol* 43: 755-761.

[8] LEE, J. J., HUNTER S. H. AND BOVEE E. C. (1985). *An illustrated guide to the protozoa*. Society of Protozoologists Lawrence, Kansas.

[9] RODRIGUEZ, G. G., PHIPPS, D ISHIGURO, K Y RIDGWAY, F (1992). Use of a fluorescent redox prob for direct visualization of actively respiring bacteria. *Applied and environmental microbiology*, 6(58) : 1801-1808.

[10] SPANJERS, H. Y VANROLLEGHEM, P. (1995). Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge. *Wat. Sci. Technol* 31(2): 105-114.

[11] WINDING, A; BINNERUP S (1994). Viability of Indigenous Soil Bacteria Assayed by Respiratory Activity and Growth Applied and Environmental Microbiology 60 (8): 2869-2875.

[12] GRIEBE, T., SHAULE, G WUERTZ, S. (1997). Determination of microbial respiratory and redox activity in activated sludge. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 19, 118-122.