

ESTRATEGIAS DE ELIMINACIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO CON EL REACTIVO IBS® EN UN REACTOR BIOPELÍCULA

L. Cacho Rasillo, J.J. Amieva del Val e I. Tejero Monzón

Grupo de Ingeniería Ambiental
Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente
Universidad de Cantabria
Bulevar Ronda Rufino Peón, 254
39316 Tanos- Torrelavega (Cantabria)
cachol@unican.es

Resumen: Los olores debidos a compuestos del azufre son un problema en conducciones y depuradoras de aguas residuales. Ciertas condiciones que se ocasionan en estos medios favorecen la formación de sulfuro de hidrógeno, principal gas maloliente que plantea problemas técnicos debidos a su corrosividad y toxicidad, así como quejas sociales al ser fácilmente detectado por el sistema olfativo humano.

Este trabajo estudia la eliminación de olores en un reactor biopelícula de laboratorio utilizando un compuesto químico (proporcionado por la empresa ACIdEKA S.A.) inhibidor de la actividad de la biomasa sulfato-reductora. Su eficacia se estudia variando la concentración, los modos de adición y el tiempo entre dosis. Por otro lado se investiga la posible aclimatación de la biomasa al reactivo. Se consiguen rendimientos máximos de eliminación de olor (SH_2 y mercaptanos) cercanos al 99 %, utilizando dosis de $18,6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Biopelícula húmeda y adicionando de forma continua, no encontrándose indicios de aclimatación por parte de la biomasa al producto.

INTRODUCCIÓN

La generación de olores en estaciones de depuración de aguas residuales y en redes de alcantarillado plantea un problema de interés creciente, constituyendo un quebradero de cabeza para los responsables de su explotación y mantenimiento. Este fenómeno cobra más importancia en climas templados y calurosos, donde la mayor temperatura acelera los procesos anaerobios responsables de la formación de compuestos olorosos. Estos malos olores se deben a la formación de varios compuestos volátiles de bajo peso molecular como son las aminas, mercaptanos, ácidos orgánicos, alcoholes, amoniaco y sulfuros.

El compuesto maloliente más importante, por encontrarse en mayores concentraciones que otros, generado en redes de alcantarillado y en estaciones de depuración es el sulfuro de hidrógeno (Burgess *et al.*, 2001; Bowker *et al.*, 1985; Gostelow *et al.*, 2001a, 2001b; Li *et al.*, 1998; Stuetz *et al.*, 1999). Además, este compuesto es detectado por el sistema olfativo humano a muy bajas concentraciones, alrededor de 0.5 ppb (Li *et al.*, 1998; Hobson y Yang, 2001).

Se trata de un gas muy volátil, con olor a huevos podridos que se produce como consecuencia de la descomposición anaerobia de la materia orgánica en presencia de sustancias inorgánicas que contienen azufre. La importancia de la existencia de este gas disuelto en el agua y en la atmósfera de la red de alcantarillado es doble: su corrosividad y su toxicidad.

La generación de SH_2 ocurre primordialmente en sistemas de alcantarillado que trabajan por gravedad así como en las estaciones de bombeo. Se produce por la reducción de compuestos que contienen azufre, especialmente del anión sulfato, que es uno de los aniones más comunes en aguas naturales. Aparece aún en mayor concentración en las aguas de lluvia que provienen de masas de aire que han estado en contacto con zonas urbanas, por lo que su concentración puede variar desde unos pocos a cientos $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Drinking Water and Health, 1977). Una fuente de azufre en las aguas residuales domésticas son las excreciones, proporcionando azufre orgánico en una concentración de $1\text{-}3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Otro aporte de anión sulfato muy importante

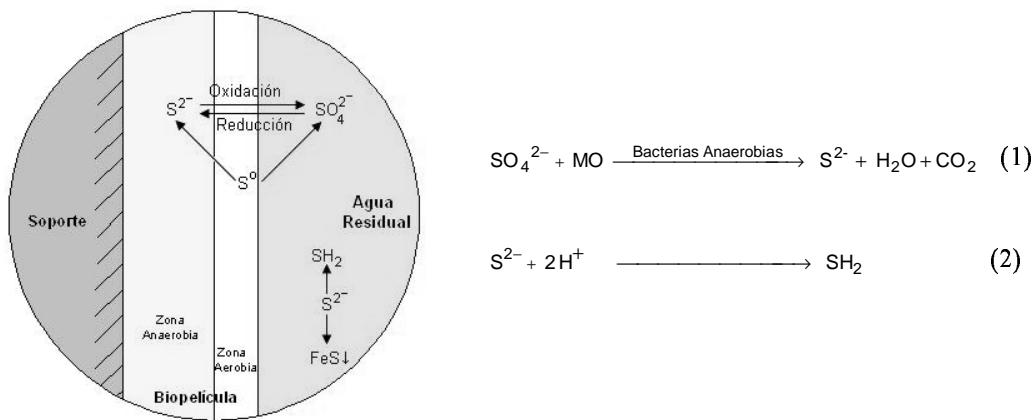


Figura 1. Reacciones de oxidación-reducción interviniéntes en la formación de SH₂

es la ocasionada por infiltración de masas de agua marinas en la propia red de alcantarillado. Las reacciones que tienen lugar y que conllevan la formación de sulfuros disueltos son las indicadas en la Figura 1.

Las bacterias sulfato reductoras están presentes en la biopelícula así como en los sedimentos que se acumulan en los sistemas colectores de agua residual. Crecen en la zona más interna de la biopelícula, donde se dan condiciones anaerobias. Algunos de los géneros incluidos en este grupo, según Widdel (1986) son: *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfobacter*, *Desulfolobus*, *Desulfococcus*, *Desulfonema*, *Desulfosarcina* y *Thermodesulfobacterium*.

El SH₂ es un gas muy tóxico y muy corrosivo. Al pasar de la fase acuosa a la atmósfera del colector, puede oxidarse y formar H₂SO₄ que ataca diversos materiales como hormigón o distintos metales: Fe, Zn, Cu, Pb y Cd, así como equipos electromecánicos de acero (Bowker *et al.*, 1985).

Para sortear estos problemas se puede actuar de diversos modos (Hvitved-Jacobsen y Nielsen, 2000):

- evitando la reducción de sulfatos mediante adición de aire, oxígeno puro o nitratos (como aceptores de electrones)
- eliminando los sulfuros disueltos mediante adición de sales de hierro como FeCl₂ o FeSO₄. Los sulfuros disueltos reaccionan rápidamente con el hierro y se produce FeS, compuesto insoluble de color negro
- con métodos que afecten de alguna forma al sistema biológico, como adición de sustancias alcalinas que eleven el pH, adición

de cloro u oxidantes como el agua oxigenada o el ozono

- mediante métodos mecánicos como el lavado o uso de sistemas que despeguen la biopelícula de las paredes del colector

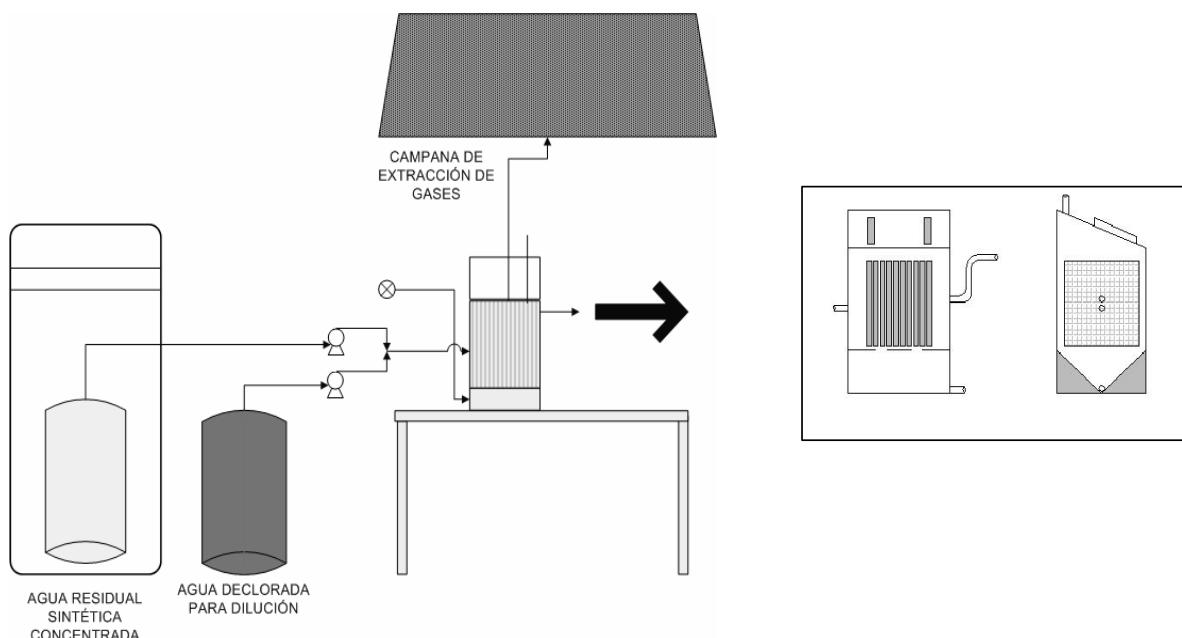
Un enfoque nuevo para el tratamiento de estas aguas residuales con carga de sulfatos, en sistemas que se sabe a priori que van a favorecer condiciones anaerobias, es la inhibición de la biomasa responsable de la reducción del anión sulfato.

El sistema IBS (Inhibición de Bacterias Sulfato-Reductoras), presentado por la empresa ACIdEKA S.A., está basado en los efectos inhibidores que tiene la Antraquinona (AQ) (Patente 5385842) sobre los microorganismos causantes de la reducción de los sulfatos a sulfuros, compuestos precursores del SH₂, responsable del olor, toxicidad y corrosión.

METODOLOGÍA

La metodología está basada en el desarrollo de una biopelícula en la que proliferan las bacterias sulfato reductoras, al igual que sucede en los colectores o alcantarillas. En condiciones reductoras (anaerobias), con suficiente cantidad de materia orgánica y una fuente de azufre inorgánico se genera una cantidad apreciable de sulfuros. Estos sulfuros disueltos en agua forman SH₂ (gasoso) el cual es cuantificable (Figura 1). Bajo estas condiciones se pueden llevar a cabo los ensayos con el reactivo inhibidor de estas bacterias y probar su eficacia, así como la dosis necesaria, tiempo de reacción y si existe aclimatación por parte de la biomasa al propio reactivo.

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen	(L)	17,82
No. de soportes		10
Superficie unitaria por soporte	(m ²)	0,06
Superficie específica total	(m ²)	0,6
Caudal entrada agua residual	(L/d)	150
Carga orgánica	Kg DQO /m ³ .d)	1,3
Carga orgánica aplicada	(g DQO/m ² .d)	37,5
TRH	(h)	2,85

Tabla 1. Condiciones de operación reactor de laboratorio**Figura 2.** Diagrama de la planta piloto y detalle del reactor biopelícula de laboratorio

Reactores biopelícula

Para el desarrollo de la biopelícula se utilizaron unos soportes diseñados y patentados por el Grupo de Biopelícula del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria (Patente ES 2 128 962 B1).

El comienzo de la experimentación se llevó a cabo con agua residual real, para facilitar la formación de la biopelícula sobre estos 10 soportes. Para ello, el reactor se ubicó en la estación piloto de depuración de aguas residuales que posee el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria en la Vaguada de Las Llamas (Santander-Cantabria). Las condiciones de operación de este reactor fueron las adecuadas para el desarrollo de bacterias reductoras de sul-

fato. Una vez desarrollada la biopelícula, estos soportes fueron trasladados a un nuevo reactor de laboratorio para la realización de los ensayos de prueba del reactivo IBS.

Las características físicas y de operación de este reactor se recogen en la Tabla 1.

Este nuevo reactor fue alimentado con agua residual sintética concentrada que se diluía con agua declorada como se aprecia en el diagrama de flujo de la Figura 2 hasta alcanzar las concentraciones de trabajo, las cuales aparecen reflejadas en la Tabla 2. Para la producción controlada de SH₂ se añadió una fuente de sulfatos en el agua de alimentación, de forma que las condiciones de generación de SH₂ fuesen más o menos constantes y similares a las que pueden existir en una red de alcantarillado.

VARIABLE	CONCENTRACIÓN DE TRABAJO	COMPUESTOS UTILIZADOS
Materia orgánica (DQO)	250mg O ₂ /L	Glucosa
SO ₄ ²⁻	39mg/L	Na ₂ SO ₄ , MnSO ₄ , MgSO ₄
Oligoelementos	0,54 ppm, 31 ppb, 2,5 ppm y 0,9 ppm	Ca ²⁺ , Fe ³⁺ , Mg ²⁺ y Mn ²⁺
pH	7,2	Tampón fosfato

Tabla 2. Características del agua residual sintética utilizada

La relación DQO/sulfato del agua residual es importante, ya que su valor repercute en la competición entre bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, la cual se vuelve más acusada para valores por debajo de 0,67. Para valores superiores hay, en teoría, suficiente materia orgánica disponible como para reducir por completo el sulfato disponible (Rinzema y Lettinga 1988). La relación DQO/sulfato utilizada en los ensayos que se describen fue de 6,4.

Existen otras variables que influyen en la generación de SH₂ (gas) en un sistema biológico: la concentración de anión sulfato afluente, la cantidad de materia orgánica disponible para la biopelícula (DQO afluente), el oxígeno disuelto en el agua, el pH y la temperatura. Todas ellas fueron controladas para estudiar el efecto del reactivo IBS en la eliminación del SH₂ generado por la biopelícula. La temperatura de los ensayos fue de 17±1°C.

Técnicas analíticas

Para el registro de olores se utilizó el detector Jerome 631-X de Arizona Instrument Corporation. Se trata de un analizador de SH₂ en aire con un rango de medición de 3 ppb- 50 ppm. En la configuración del reactor se instaló una "T" en la conducción de salida del gas, para poder llevar a cabo las mediciones de SH₂. La disposición de dos llaves con apertura y cierre alterno desviaba el flujo de gas de su trayecto de salida normal (hacia la campana extractora) al equipo de medición. Para el establecimiento de la concentración de SH₂ en un tiempo "t" se llevaron a cabo 10 mediciones, descartándose la máxima y la mínima y calculando la media con el resto de valores. Se determinó, así mismo, la concentración de fondo de la habitación para restar este valor al valor medio de registro de SH₂ en la corriente de gas.

El resto de parámetros: DQO, Sulfuros, Sulfatos, y pH fueron determinados según las instrucciones de la APHA (1995).

Plan Experimental

Se llevaron a cabo diversos ensayos para la determinación de los siguientes parámetros:

1. La *dosis de reactivo* para conseguir una máxima eliminación de olor en el sistema. Esta dosis se expresa en miligramos de reactivo por gramo de biopelícula húmeda. Para ello se pesaba la biopelícula antes de cada ensayo. La biopelícula con los soportes eran extraídos del reactor y dejados escurrir durante 15 minutos antes de ser pesados. Se partió de una dosis orientada por parte de la casa comercial que suministraba el producto. Esta dosis había sido obtenida en ensayos en campo. Se probaron dosis de 6,2mg·g_{Bp}⁻¹ húmeda y 18,6mg·g_{Bp}⁻¹ húmeda.
2. El *tiempo de reacción* o tiempo necesario para que el reactivo haga efecto a la biopelícula. Se entiende por efectividad del reactivo la disminución de la concentración inicial de SH₂ y mercaptanos en un 80 %.
Para comprobar si el reactivo necesitaba un tiempo de reacción se efectuaron dos metodologías de alimentación del reactor en distintos ensayos: a) interrupción de la alimentación de agua residual sintética durante 3 horas una vez añadido el reactivo. Así éste impregnaba la biopelícula (se mantenía en agitación mediante la propia aireación del sistema) realizándose mediciones de SH₂ gas a la salida del reactor cada 30 minutos durante esas 3 horas. Transcurrido este tiempo se conectaba de nuevo la alimentación y se continuaba con las mediciones y b) no interrupción de la alimentación de la fuente de SO₄²⁻ (agua residual sintética) al adicionar el pulso de reactivo.
3. La *duración del efecto*. Se llevaron a cabo ensayos en los que se añadieron pulsos

únicos discretos, pulsos discretos sucesivos y un último ensayo en el que se adicionó reactivo en continuo para estudiar la prolongación del efecto inhibidor, así como su eficacia en el tiempo.

4. La posible *aclimatación* de la biomasa al reactivo.

La forma de adición de reactivo IBS en función del registro instantáneo de SH₂ se sustenta en la asunción de que la concentración de SH₂ en el gas de salida es función de la actividad de la biopelícula. Esto se puede asumir puesto que el caudal de gases de salida es constante e igual al caudal de aireación.

La dosificación de reactivo IBS se realiza en función de la actividad de la biomasa. Se entiende de una actividad de la biomasa del 100 % para el tiempo cero de cualquiera de los experimentos. Para este tiempo la dosis inicial es de 18,6mg de reactivo·g_{Bp}⁻¹ húmeda. Para los pulsos sucesivos se añade la misma dosis corregida por la reducción de la actividad de la biomasa provocada por los pulsos anteriores de reactivo. Esta reducción de la actividad se mide a través de la medición de la concentración de SH₂ en el gas de salida.

Así, para un tiempo "t" la dosis de reactivo se calcula:

$$[\text{Dosis}]_t = [\text{Dosis}]_0 \times \frac{[\text{SH}_2]_t}{[\text{SH}_2]_0}$$

En cuanto al mecanismo de inhibición enzimática que provoca la antraquinona en la biomasa sulfatorreductora no es bien conocido a nivel científico. A juzgar por los resultados de los ensayos de pulsos podría tratarse de una inhibición de tipo irreversible dado que transcurrido un tiempo, la biomasa vuelve a ser activa en la producción de SH₂.

La siguiente secuencia de acción del reactivo, aunque no puede ser probada debido al diseño de los experimentos, que no responde de forma inicial a este objetivo, explicaría el funcionamiento del IBS: adición del pulso, el reactivo tarda el tiempo de reacción en hacer efecto, la antraquinona inhibe la actividad enzimática (sulfatorreductora) de la biomasa, pero al tratarse de una biomasa facultativa puede utilizar otro acceptor de electrones alternativo y seguir creciendo. En el momento que la antraquinona es lavada del sistema, poco a poco la biomasa vuelve a utilizar el ión sulfato como acceptor de electrones, comenzando de nuevo la generación de SH₂.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de los siguientes ensayos:

- Pulso único: Para la determinación de la dosis óptima. Con ellos se determinó la mínima dosis de reactivo necesaria para obtener el máximo rendimiento de eliminación de SH₂.
- Doble pulso: Para estudiar la duración del efecto.
- Pulso repetido: Determinación de la duración del efecto y aclimatación de la biomasa al producto.
- Adición de reactivo de forma continua: Determinación de la duración del efecto y estudio de la aclimatación de la biomasa al producto.

Ensayo 1A. Pulso único

El peso de la biopelícula al comienzo del ensayo fue de 1620 g. La dosis de reactivo elegida fue de 18,6mg·g_{Bp}⁻¹ húmeda. Se interrumpió la alimentación del reactor durante las tres primeras horas contadas a partir de la adición del reactivo IBS. El tiempo de reacción (tiempo al cual se consigue un descenso de un 80 % de la concentración de SH₂ inicial), fue de 2 horas. Se consiguió una eliminación máxima de sulfuro de hidrógeno del 100 % y el efecto tuvo una duración de unas 22 horas. Se entiende por duración del efecto la estabilización del sistema con una producción de SH₂ inferior al 80 % de la inicial.

Ensayo 1B. Pulso único

El peso de la biopelícula para este segundo ensayo resultó de 2090 g. La dosis de reactivo utilizada de 6,2mg·g_{Bp}⁻¹ húmeda. En este ensayo también se interrumpió la alimentación del agua residual sintética durante las tres primeras horas. El tiempo de reacción para este ensayo fue de unas seis horas. Aunque el máximo rendimiento en la eliminación de SH₂ es alto; 96.4 %, la dosis de reactivo añadida es tan baja que no se puede determinar la duración del efecto, debido a que el tiempo entre mediciones es mayor que el propio tiempo de duración del efecto. En cualquier caso no supera las tres horas.

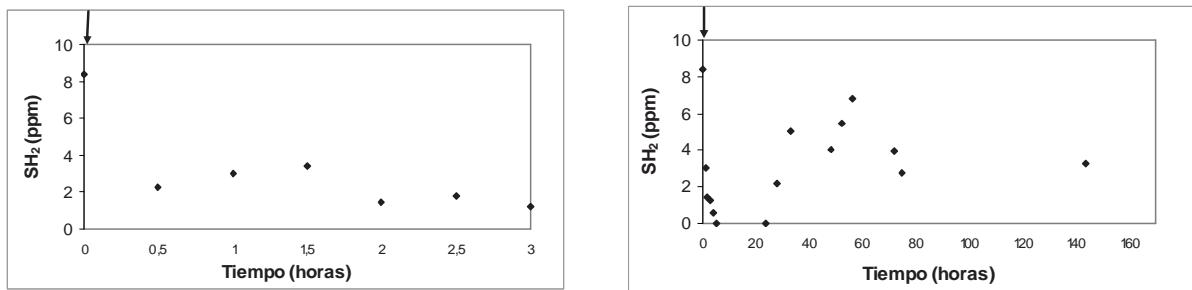


Figura 3. Evolución del SH₂ en el Ensayo 1A. Pulso único

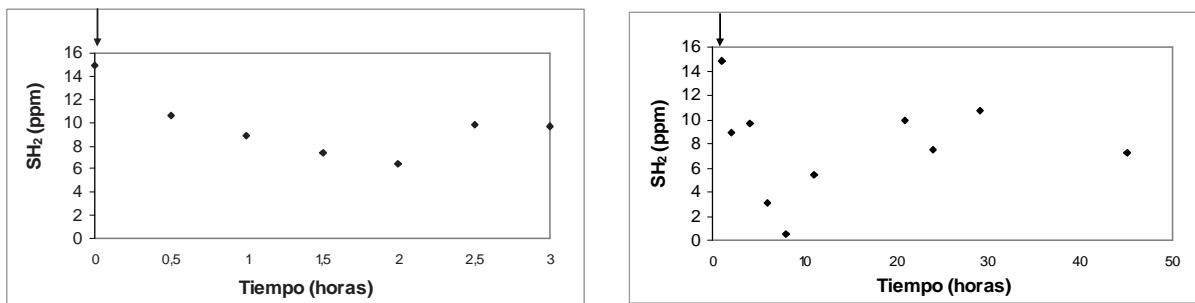


Figura 4. Evolución del SH₂ en el Ensayo 1B. Pulso único

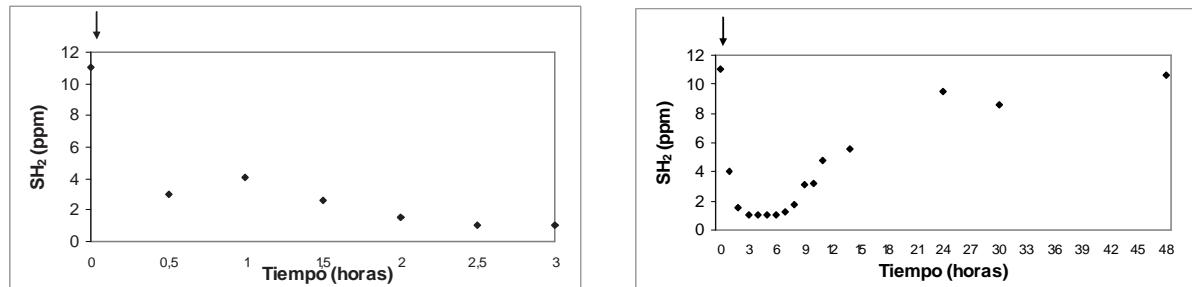


Figura 5. Evolución del SH₂ en el Ensayo 1C. Pulso único

Ensayo 1C. Pulso único

La dosis elegida fue de $18,6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}_{\text{Bp húmeda}}$ y el peso de la biopelícula de 2154g. En este caso el pulso fue añadido en el tiempo cero sin pararse la alimentación del sistema. El tiempo de reacción observado es de 1,5-2 horas, similar al conseguido con la misma dosis en el ensayo 1A. El máximo rendimiento alcanzado en la eliminación de SH₂ fue del 89 % y la duración del efecto de 6 horas.

Ensayo 2. Doble pulso

Mediante este ensayo se determinó la capacidad del reactivo para prolongar su actividad de inhibición. El primer pulso se añadió a tiempo cero y el segundo transcurridas ocho horas y

media del inicio, más o menos al tiempo previsto de duración del efecto inhibidor.

El peso de la biopelícula al comienzo de este ensayo fue de 2194g. La dosis añadida en el primer pulso es de $18,6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}_{\text{Bp húmeda}}$. El máximo rendimiento logrado fue del 99 % y la duración del efecto de 6 horas. La dosis añadida en el segundo pulso es proporcional a la generación de SH₂ en ese tiempo y correspondiente a $2,4\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}_{\text{Bp húmeda}}$. Con esta segunda dosis el rendimiento máximo alcanzado es de un 70 % de la concentración de SH₂ medida en $t = 8$ horas. Respecto de la concentración medida en $t = 0$ se alcanza un máximo rendimiento del 96 % prolongándose la actividad por espacio de tres horas y media más.

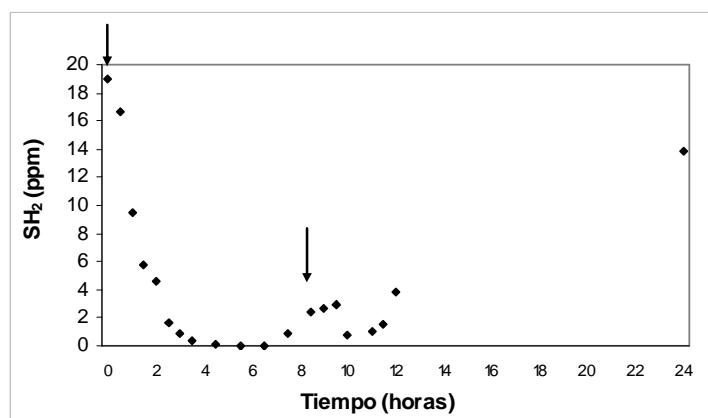


Figura 6. Evolución del SH₂ en el ensayo 2. Doble pulso

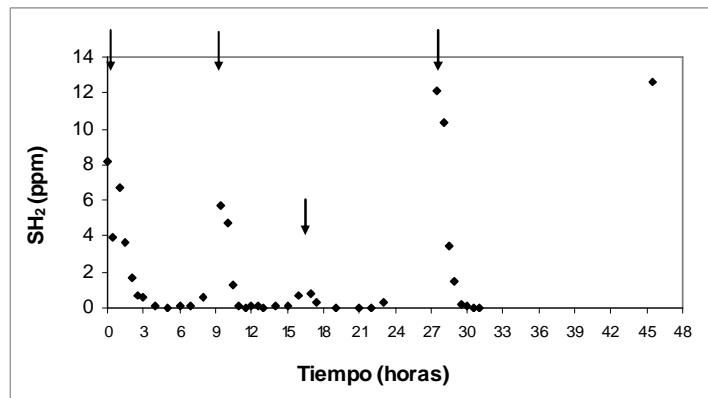


Figura 7. Evolución del SH₂ en el ensayo 3. Pulsos repetidos

Ensayo 3. Pulsos repetidos

Al igual que en el ensayo anterior se adicionaron diferentes pulsos cada uno con la dosis proporcional a la generación en ese instante de SH₂. Los tiempos a los que estos pulsos fueron suministrados corresponden a $t = 0$, $t = 10$, $t = 17$ y $t = 27,5$ horas, siendo las dosis de 18,6, 12, 1,72 y 18,6mg·g⁻¹Bp húmeda. El peso de la biopelícula medida al comienzo del ensayo fue de 2263g.

En la Figura 7 se aprecia la efectividad del reactivo con la adición de un nuevo pulso. Se registraron valores muy altos de eliminación de olor con la adición de cada uno, en todas las ocasiones se alcanzaron eliminaciones del 99 % del SH₂ registrado inicialmente. En cuanto a los rendimientos respecto a la concentración de SH₂ medida en el momento de adición del pulso, se encontraron en los cuatro casos valores superio-

res al 99 %.

Los tiempos de reacción para este ensayo oscilaron entre las dos horas en el caso del primer pulso y una hora en el caso del segundo. Para los pulsos tercero y cuarto el tiempo de reacción está comprendido entre estos dos valores.

Respecto a la duración del efecto por pulso añadido, éste está comprendido entre las 6 y las 7 horas. No se observó aclimatación de los microorganismos al producto.

Ensayo 4. Adición en continuo

En este ensayo se adicionó un caudal bajo de reactivo, 200mL·h⁻¹, de forma que no interfirió en el tiempo de retención hidráulico del sistema. La concentración del reactivo en dicho flujo era de 16,46g/L siendo la carga afluente de 34,10mg IBS·g⁻¹Bp húmeda · d⁻¹ para una cantidad de biopelícula al comienzo del ensayo de 2315g.

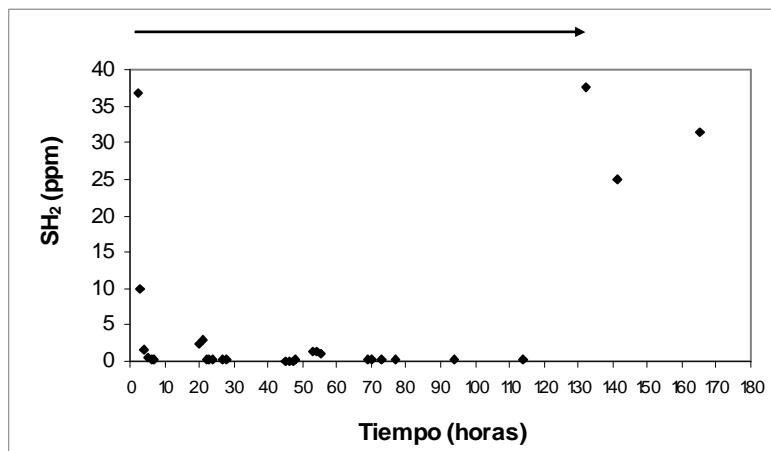


Figura 8. Evolución del SH₂ en el ensayo 4. Adición en continuo

Los resultados obtenidos se observan en la Figura 8. Se permaneció añadiendo reactivo durante 130 horas. El máximo porcentaje de eliminación de olor es del 99 % de la concentración inicial y la duración del efecto tan larga como se esté añadiendo reactivo.

La concentración de SH₂ en el gas de salida vuelve a los niveles existentes al inicio del ensayo al cesar la adición de reactivo inhibidor. Se observa en este ensayo un cambio en las características físicas de la biopelícula, la cual se hace más esponjosa y menos adherente a los soportes.

En todos los ensayos realizados se midió la eficacia del sistema en la eliminación de DQO. La finalidad de la operación del sistema no era la eliminación de DQO, sino la reducción de los sulfatos añadidos en el agua afluente y la consecuente producción de sulfuros para su medición y posterior tratamiento de dichos olores. Tras la adición del producto inhibidor de las bacterias sulfato reductoras no se observó un descenso acusado en la eliminación de la DQO por parte del sistema, pasando de rendimientos del orden de 25 - 30 % antes de la adición a valores del 20 - 25 % una vez añadido el reactivo y mientras éste hacía efecto.

CONCLUSIONES

La dosis óptima encontrada es de $18,6\text{mg}\cdot\text{g}_{\text{Bp húmeda}}^{-1}$. Dosis menores proporcionan peores resultados de eliminación de SH₂ al no conseguir un efecto con una duración relevante.

Los rendimientos de eliminación de olor superan en todos los casos el 89 % llegando en algunos casos al 99 % y los tiempos de duración

del efecto se acercan a las 6 horas en el caso de adición de un pulso individual de concentración $18,6\text{mg}\cdot\text{g}_{\text{Bp húmeda}}^{-1}$, mientras que para el caso de adición en continuo la duración del efecto dura tanto como dure la adición.

En el caso de los ensayos de pulsos, la asunción propuesta, de adición de una cantidad de reactivo proporcional al SH₂ remanente en el sistema, parece dar buenos resultados, obteniéndose rendimientos elevados (cercanos al 99 %) y homogéneos entre distintos pulsos. Esto podría ser una herramienta para la determinación de la dosis a añadir en un colector con problemas de olores; la dosis se calcularía de forma directa tras efectuar medida del SH₂.

La adición de reactivo de forma continua proporciona los mismos rendimientos que los ensayos de pulsos, cerca de un 99 %. La necesaria dilución del reactivo para llevar a cabo el ensayo de adición en continuo, no afecta a las propiedades del mismo, a la vista de los resultados de rendimiento obtenidos, pero sí se encuentra una afección a las características físicas de la biopelícula, que se vuelve menos adherente a los soportes.

En ningún momento se observa una disminución de la eficacia del reactivo como inhibidor de las bacterias sulfato-reductoras, no encontrándose aclimatación de la biomasa al reactivo.

Aunque el objeto del proceso no era la eliminación de DQO, no se observa un descenso importante en el rendimiento del sistema al respecto, reduciéndose éste en un 5 % al añadir el reactivo inhibidor al proceso.

LISTA DE SIMBOLOS

APHA - American Public Health Association
 Bp - Biopelícula
 DQO - Demanda Química de Oxígeno
 IBS - Inhibición Bacterias Sulfato-reductoras
 MO - Materia Orgánica

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de la empresa ACIdEKA S.A. por el suministro de reactivos para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

- APHA (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19a Edición, Washington, D.C.
- Bowker, R., Smith, J. y Webstern, O., (1985). Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants. EPA Design Manual. EPA 625/1-85/018.
- Burgess, J.E., Parsons, S.A. y Stuetz, R.M., (2001). Developments in Odour Control and Waste Gas Treatment Biotechnology: A Review. *Biotechnology Advances*, 19, 35–63.
- De los Santos M, Esteban A.L. y Tejero I., (2002). Generación de olores en reactores biopelícula en condiciones extremas de operación. Tesina de Master. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.
- Drinking Water and Health, (1977). National Academy of Sciences, Washington, DC.
- E.I. Du Pont de Nemours y Company, (1995). Anthraquinones as inhibitors of sulfide production from sulfate-reducing bacteria. Estados Unidos. Patente de invención número 5385842, 1995-01-31.
- Gostelow, P., Parsons, S.A. y Stuetz, R.M., (2001a). Odour Measurement for Sewage Treatment Works. *Water Research*, 35 (3), 579–597.
- Gostelow, P. y Parsons, S.A., (2001b). Hydrogen Sulfide Measurement. En Stuetz, R. y Frechen F. (eds.), *Odours in Wastewater Treatment: Measurement, Modelling and Control*. IWA Publishing. London. UK. pp. 120–129
- Hobson, J. y Yang, G., (2001). Odour Mapping Using H₂S Measurements. En *Odours in Wastewater Treatment: Measurement, Modelling and Control*. Stuetz, R. y Frechen, F. (eds.), IWA publishing, London, UK. pp. 214–231.
- Hvitved-Jacobsen T. y Nielsen Halkjær Nielsen, (2000). Sulphur transformations during sewage transport. En Lens P.N.L. y Hulshoff Pol L. (eds.), *Environmental Technologies to Treat Sulphur Pollution, Principles and Engineering*, London, IWA Publishing, pp. 131–151.
- Hydrogen Sulphide. Report by Committee on Medical and Biological Effects of Environmental Pollutants (Subcommittees on Hydrogen Sulphide), Division of Medical Sciences, National Research Council, Washington, DC, 1979.
- Li, X.Z., Wu, J.S. And Sun y D.L., (1998). Hydrogen Sulphide and Volatile Fatty Acid Removal Foul Air in a Fibrous Bed Bioreactor. *Water Science and Technology*, 38 (3), 323–329.
- Rinzema, A. y Lettinga G., (1988). Anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. En Wise D.L. (ed.), *Biotreatment Systems*, Vol. III, Boca Raton, USA, CRC Press Inc., pp. 65–109.
- Stuetz, R.M., Fenner, R.A. y Engin, G., (1999). Assessment of Odours from Sewage Treatment Works by an Electronic Nose, H₂S Analyses and Olfatometry. *Water Research*, 33 (2), 453–461.
- Universidad de Cantabria, (2000). Proceso de tratamiento biológico de aguas basado en biopelícula sobre soporte de diseño específico. España, patente de invención número ES2128962B1, 2000-04-01.
- Widdel, F., (1985). Sulphate-reducing bacteria and their ecological niches. En Barnes E.M. y Mead G.C. (eds.), *Anaerobic bacteria in habitats other than men*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, pp. 157–184.