

# Control de la Deficiencia de Nutrientes en un Proceso de Depuración Biológica

Para el correcto desarrollo de la flora bacteriana de los fangos activos, la presencia de nutrientes como nitrógeno y fósforo es necesaria en adecuada proporción con el carbono. Cuando las cantidades de nitrógeno son muy elevadas pueden existir problemas de inhibición por formación de amonio, sobretodo en valores altos de pH. Otros tipos de micro-nutrientes serán necesarios en pequeñas cantidades, como sulfuro, potasio, calcio, magnesio y otros elementos traza como el hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, etc. Los sustratos normalmente contienen una cantidad suficiente de estos elementos. Altas concentraciones de estos elementos pueden producir efectos inhibidores sobre el proceso, así que se deberá de realizar un análisis químico del sustrato cuando la concentración de alguno de estos elementos sea alta.

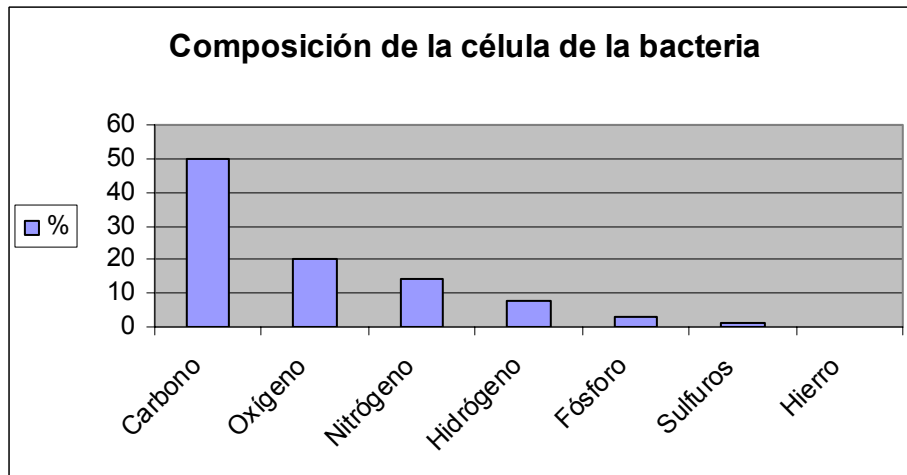


Figura 1 – Composición de la célula de una bacteria de fango activo

El hierro es quizás uno de los micro-nutrientes más importantes. Representa el 0,2% de la célula y es un componente esencial para el ciclo de la nitrificación/desnitrificación así como para el proceso de oxidación/reducción de las reacciones bioquímicas que afectan directamente a la formación del flóculo.

Aunque los micro-nutrientes pueden jugar un importante papel en la formación de la biomasa, en este tratado, cuando hablemos de nutrientes nos referiremos exclusivamente a los macro-nutrientes N y P.

## 1. Control del Requerimiento de Nitrógeno y Fósforo

El nitrógeno y fósforo pueden ser un factor limitante en caso de que no estén presentes en cantidad suficiente en el agua residual influente al proceso de depuración. Por esta razón la medida a tomar es la de controlar el proceso mediante la adición de cantidades de nutrientes necesarias para que la depuración biológica se desarrolle normalmente.

En general, este control se suele aplicar a plantas de depuración con vertidos industriales en donde existen signos evidentes de una falta de nutrientes.

Existen varios caminos para llevar este control, y en este tratado nos basaremos en una metodología práctica y comprobada.

## 2. Indicadores de la Deficiencia de Nutrientes

Cuando existe una deficiencia de nutrientes, normalmente tiene lugar una superproducción de polisacáridos. La consecuencia de todo ello es que el fango pasa a tener una pobre decantabilidad, un posible efecto bulking y problemas en su deshidratación.

También este efecto puede producirse por deficiencia de oxígeno o un desequilibrio en el F/M.

Los indicadores que evidencian una falta de nutrientes suelen ser los siguientes:

1. Concentración de nitrógeno inorgánico total ( $\text{NH}_3 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2$ ) soluble en el efluente por encima de 1 mg/l.

Notar que no se utiliza el dato del fósforo total y nitrógeno Kjeldahl (nitrógeno de compuestos orgánicos y nitrógeno amoniacal) ya que en muchos casos no pueden ser hidrolizados con la suficiente rapidez como para establecer una proporcionalidad con la utilización de la fuente de carbono.

2. Concentración de orto-fósforo ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) en el efluente por encima de 0,2 mg/l

El P debe ser orto, ya que el P orgánico se puede oxidar con el tratamiento biológico.

3. Bulking

- Fango filamentoso: Un fango activo con un índice volumétrico de fango (IVF) mayor que 150 ml/g puede ser clasificado como un fango filamentoso.

Por el contrario: Un fango que sedimenta muy rápidamente y con un valor de IVF menor que 70 ml/g produce un sobrenadante turbio: esta condición se conoce como "pin-point floc".

- La presencia de bacterias filamentosas se hace evidente en la deficiencia de nutrientes. En este caso, como filamentosas representativas podemos citar la proliferación del tipo Thiothrix I y II, tipo 021N y N. Limicola



Thiothrix I



Thiothrix II



021N



N. Limicola

Figura 2. Bacterias filamentosas típicas indicadoras de deficiencia de nutrientes

Pueden también coexistir S. Natans, H. Hydrosis y Tipos 0041 y 0675

- Fango viscoso y/o con espumas: con contenido de polímero extracelular.

### 3. Relación de Nutrientes recomendada

Actualmente además de recomendarse la ya tradicional relación de DBO/N/P de 100/5/1, quizás con mayor propiedad, para tratamiento de aguas mixtas e industriales se recomienda la relación DQO/N/P con valores de 100/2,5/0,5. Cualquier relación debe tomarse a modo de guía y no como dato definitivo.

Para establecer la relación se utilizarán muestras integradas de 24 horas.

Para esta relación, como DQO, entendemos la DQO decantada de entrada a biológico.

Como N se debe utilizar el Nitrógeno Inorgánico Total ( $(\text{NH}_3 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2)$ )

Como P se debe utilizar el Orto-Fósforo (PO<sub>4</sub>-P)

El Nitrógeno combinado orgánicamente (NTK) y fósforo total no pueden ser hidrolizados lo suficientemente rápidos en el fango activo como para mantener el ritmo de utilización de la fracción biodegradable de la DQO.

### 4. Adición de Nutrientes

En caso de deficiencia de nutrientes, deben dosificarse directamente en el agua residual influente al proceso o en el propio reactor biológico.

#### Fuente de nitrógeno

Aunque pueden utilizarse otros compuestos, normalmente se usa la urea.

- Urea

La urea es uno de los compuestos más utilizados para el restablecimiento de la falta de nitrógeno. Para su uso, se recomienda dosificarla en cabecera de planta con el fin de permitir un tiempo suficientemente largo como para que la enzima Ureasa (presente en el licor-mezcla) la pueda hidrolizar y dar paso a la formación de aminas que subsecuentemente serán utilizadas por las bacterias.

#### Fuentes de fósforo

Los más utilizados son los siguientes:

- Una mezcla 50/50 % de  $\text{K}_2\text{HPO}_4/\text{KH}_2\text{PO}_4$
- $\text{H}_3\text{PO}_4$  (con control de pH)

A efectos de cálculo se debe tener en cuenta lo siguiente:

1 g de Urea corresponde 0,47 g de N  
1 g de orto P corresponde a 0,33 g de P

#### A modo de ejemplo

Supongamos que una planta tiene las siguientes cargas:

Carga DQO = 250 kg/d  
Carga N = 1.30 kg/d  
Carga P = 0.90 kg/d

Si tomamos la relación 100/2,5/0,5, obtenemos los siguientes valores:

$$250/N = 100/2,5 \quad N = 6,25$$

Como ya tenemos 1,30, la carga N a añadir sería de  $6,25 - 1,30 = 4,95$  Kg/d

$$250/P = 100/0,5 \quad P = 1,25$$

Como ya tenemos 0,90, la carga P a añadir sería de  $1,25 - 0,90 = 0,35$  Kg/d

## 5. Respirometría aplicada al control de Nutrientes

Una de las mejores opciones para la confirmación de la deficiencia y determinación de la relación DQO/N/P es la de un sistema de respirometría de laboratorio y los correspondientes analizadores de N y P que nos interesan.

Desde la respirometría se pueden obtener varios parámetros que nos pueden permitir un control coherente de la relación COD/N/P

Las aplicaciones que podemos seguir en este sentido son las siguientes:

1. Determinación de las concentraciones mínimas de N y P al final del proceso.
2. Influencia del crecimiento de la biomasa Y.
3. Relación del crecimiento de la biomasa con F/M y la edad del fango (MCRT).
4. Actividad biológica.

### 5.1. Determinación de las Concentraciones Mínimas de N y P al Final del Proceso.

Tal como se comentó anteriormente, en la relación DQO/N/P de 100/2,5/0,5 es tan solo una guía orientativa. Para la exacta determinación de esta relación debemos recurrir a sistemas de análisis que bajo un determinado procedimiento nos proporcionen una mejor proporción de valores.

El método a seguir debe basarse en el análisis del resultado final de un proceso de depuración. Para ello, uno de los mejores sistemas para llevar a cabo este tipo de análisis es la respirometría junto con otros parámetros complementarios.

El tipo de respirómetro a utilizar debe estar provisto de un modo de trabajo para la medida del OUR secuencial (OUR cíclico) y un modo dinámico para la rápida determinación del consumo de oxígeno utilizado (OC). En cualquiera de los casos el software del equipo deberá poder llevar a cabo los respirogramas correspondientes para el análisis y seguimiento de resultados a lo largo del tiempo.

El procedimiento pasa por los siguientes análisis:

#### 1 - Confección del licor-mezcla equivalente al del proceso real

Antes de nada, debemos crear un licor-mezcla equivalente al del inicio del proceso. Para ello, utilizaremos un volumen de muestra de agua residual ( $V_m$ ) y fango ( $V_f$ ) equivalentes a los correspondientes caudales del influente ( $Q_i$ ) y fango de recirculación ( $Q_r$ ) a reactor biológico.

$$V_m / V_f = Q_i / Q_r$$

Puesto que en nuestro caso no vamos a tener en cuenta una posible demanda de oxígeno por nitrificación, a la mezcla le añadiremos una dosis de inhibidor de nitrificación (ATU: Allyl-Tiourea) en la relación de 3 mg ATU / g VSS con el fin de que los ensayos de respirometría solamente nos capten la demanda de oxígeno del sustrato orgánico a cargo de las bacterias heterótrofas.

## 2 - Niveles de DQO en el licor-mezcla al inicio del ensayo

Llevaremos a cabo la determinación de la DQO decantada del influente (DQOi) a reactor y del sobrenadante del fango de recirculación (DQOr).

Los valores efectivos en el licor mezcla (Im) serán los siguientes:

$$DQOi (Im) = DQOi * Vm/(Vm+Vf)$$

$$DQOr (Im) = DQOr * Vf/(Vm+Vf)$$

DQOi (Im), DQOr (Im): DQO efectivas de influente y fango recirculación respectivamente en el licor mezcla.

$$DQO (Im) = DQOi (Im) + DQOr (Im)$$

Con los datos obtenidos, calculamos la DQO eliminada (DQOe) y el rendimiento (E)

$$DQOe = DQOi (Im) - DQOf (Im)$$

DQOe: DQO eliminada

DQOf (Im): DQO final en el licor-mezcla

$$E = (1 - DQOe/DQOi)*100$$

E (%): Rendimiento

## 3 - OUR cíclico, tiempo de retención hidráulica (TRH) y respiración endógena

El licor-mezcla recién formado lo introduciremos en el respirómetro para llevar a cabo de inmediato un análisis en modo OUR cíclico y crear un respirograma de valores secuenciales hasta alcanzar la respiración endógena (OURend)

Con OURend (adaptando unidades) calculamos SOURend

$$SOURend = OURend/MLVSS$$

OURend (Kg O2/m<sup>3</sup>.d)

MLVSS (Kg VSS/m<sup>3</sup>)

Con el SOURend podemos obtener el parámetro cinético kd.

$$Kd = SOURend/1,42$$

Kd: Kg. de oxígeno consumido por día por Kg. de MLVSS utilizado en el proceso de respiración endógena.

El tiempo que ha tardado en completarse el ciclo completo nos determinará el tiempo de retención hidráulica (TRH) mínimo que necesita el proceso para la oxidación completa del sustrato orgánico.

Es bien conocido que la edad del fango (MCRT) tiene una relación directa con F/M y por lo tanto con TRH en proporción inversa.

Para el control de nutrientes es importante que el TRH sea coherente con el tiempo necesario para el tratamiento. Si no lo fuera, antes de proseguir con el procedimiento de control, deberá analizarse la situación.

El estudio sobre un TRH no coherente debe iniciarse con un análisis sobre la biodegradabilidad de la muestra y también su posible efecto inhibitorio sobre la actividad del fango que pudiera ralentizar la marcha normal del proceso de depuración.

#### **4 - Niveles de DQO, N y P en el licor-mezcla a la finalización del proceso de depuración biológica**

Con la finalización del ensayo OUR cíclico, desde el sobrenadante del licor-mezcla obtendremos los correspondientes valores de la DQO, N y P finales que nos interesan.

Con los valores N y P finales ya podemos obtener una evaluación primaria sobre una posible deficiencia de nutrientes mediante la aplicación del criterio que corresponde a los puntos 1 y 2 de los indicadores de deficiencia de nutrientes: orto-fosfato ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) por encima de 0,2 mg/l y nitrógeno inorgánico total ( $\text{NH}_3 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2$ ) por encima de 1 mg/l.

Si además de estos valores se detectaran unos valores de N-NH<sub>4</sub> y Fósforo por encima de normativa, se deberá aplicar el control para la eliminación de nutrientes.

#### **5 - Confirmación de la deficiencia de niveles de N y P**

Con los valores de DQO, N y P del agua residual influente, establecemos la relación DQO/N/P para comprobar su acercamiento o alejamiento de la relación guía 100/2,5/0,5. Por otro lado, con los valores de finalización del ensayo cíclico, comprobamos si la concentración del N está por encima de 1 y la del P por encima de 0,2.

A partir de estas comprobaciones, confeccionaremos una valoración de la situación.

Puesto que el caso que nos ocupa es el relacionado con la deficiencia de nutrientes, y vamos a suponer que los valores de N y P no cumplen los requisitos DQO/N/P de entrada y tampoco los valores mínimos de salida (según resultados en el ensayo OUR cíclico de respirometría)

#### **6 - Corrección de la relación DQO/N/P en base los valores obtenidos**

Desde la relación 100/2,5/0,5, obtenemos los siguientes valores N y P de partida:

$$\text{DQO/N} = 100/2,5 \quad \text{N} = 2,5 * \text{DQO}/100$$

$$\text{DQO/P} = 100/0,5 \quad \text{P} = 0,5 * \text{DQO}/100$$

$$\text{N a añadir} = \text{N} - \text{N actual}$$

$$\text{P a añadir} = \text{P} - \text{P actual}$$

## 7 - Nuevo análisis de valores de N y P a la finalización del proceso

Llevaremos a cabo un nuevo ensayo OUR cíclico, incrementando la concentración N y P en el licor-mezcla de acuerdo a los resultados obtenidos.

A la finalización del ensayo, mediremos los nuevos niveles de N y P en el sobrenadante del licor-mezcla y comprobaremos que N se sitúa por encima de 1 mg/l y P por encima de 0,2 mg/l.

Dando unos valores que indicaran una todavía deficiencia de nutrientes, añadiríamos proporcionalmente cantidades de N y P y repetiríamos el ensayo OUR cíclico hasta conseguir que N final se sitúe por encima de 1 mg/l y P final por encima de 0,2 mg/l.

De este modo determinaríamos la relación DQO/N/P de inicio definitiva en la que el proceso en su estado actual debe trabajar.

## 5.2. Influencia del Crecimiento de Biomasa observado (Y obs) en la relación COD/N/P

La influencia que existe entre el crecimiento de la biomasa y la relación de nutrientes se presenta como un complemento para reajuste y contraste de valores.

El crecimiento de la biomasa en términos de oxígeno consumido, junto con otros parámetros complementarios se lleva a cabo por respirometría a través de un ensayo dinámico en donde se obtiene el correspondiente respirograma.

Aunque desde el ensayo de respirometría del OUR cíclico se podría determinar la cantidad total de oxígeno consumido (OC), recomendamos la ejecución de un ensayo de tipo dinámico que, al carecer de tiempos muertos puede ser más coherente con su resultado. Para ello, utilizaremos un respirómetro tipo BM-T que está provisto de este modo de trabajo y que, por integración de la medida en continuo de tasas de respiración dinámicas (Rs), puede llevar a cabo el ensayo OC en un tiempo relativamente corto.

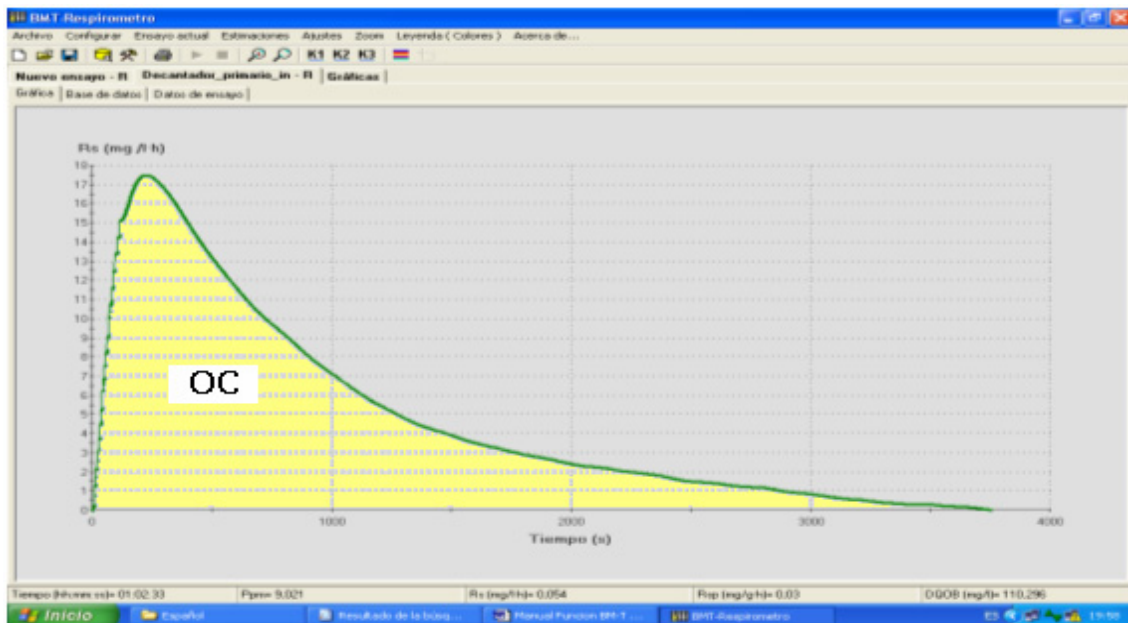


Figura 3. Respirograma dinámico para la obtención de OC

Con el dato OC (mg/l) y los valores DQO (mg/l) inicio y DQO (mg/l) final del ensayo cíclico, estaremos en condiciones de calcular la DQO soluble eliminada en el licor mezcla y el índice de crecimiento de biomasa heterótrofa (Y)

$$Y \text{ (mg O}_2\text{/mg DQO)} = 1 - \text{OC/DQO}_e$$

Otro importante parámetro es el cálculo de la DQOb:

$$\text{DQOb} = \text{OC}/(1-Y)$$

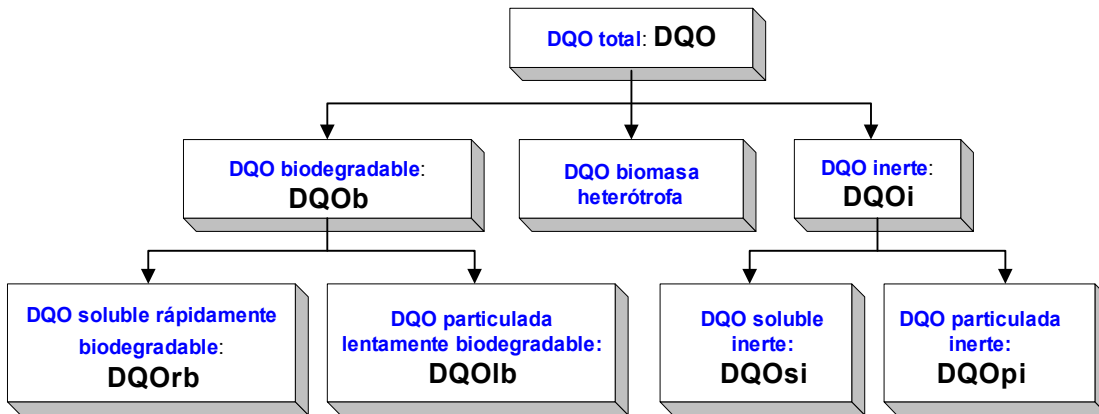


Figura 4. Fraccionamiento de la DQO

Si se trata de la DQO soluble, la DQOb puede coincidir con la DQOrb.

Cuando se tiene en cuenta la respiración endógena aparece el concepto de Y observada ( $Y_{obs}$ )

$$Y_{obs} = Y / (1 + k_d * \text{MCRT})$$

$k_d$ : Fracción de MLVSS por día oxidada durante la respiración endógena (valor típico:  $0,006 \text{ d}^{-1}$ ) – Ver punto 5.1. (3)

Cuando se asume que la eliminación de DQO es del 100% y que el contenido de N en la biomasa es del 12,3%, y el contenido en P es del 20%, el valor de  $Y_{obs}$  es de 0,41.

Cuando en el ensayo cíclico - ver punto 5.1. (1)(2) la eliminación de COD es inferior del 100% podemos calcular los valores DQO/N y DQO/P del siguiente modo:

$$N = 41 * 100 / E * Y_{obs}$$

E (%): Rendimiento - ver punto 5.1. (2)

$$P = N / 5$$

### 5.3. Relación del Crecimiento de la Biomasa con F/M y la Edad del Fango (MCRT)

Con el valor DQOb (punto 5.2.) calculamos la F/M y establecemos una relación con la edad del fango (MCRT)

$$F/M = DQOb * 24 / (MLVSS * TRH)$$

MLVSS (mg/l): Concentración de sólidos volátiles  
TRH (h): Tiempo de retención hidráulica

$$1/MCRT = Y * F/M - kd$$

La variación de DQO/N/P puede repercutir en el valor de crecimiento de la biomasa Y, y por lo tanto en la coherencia de esta expresión.

Y representa la pendiente en la ecuación de la recta que relaciona a la edad del fango con F/M:

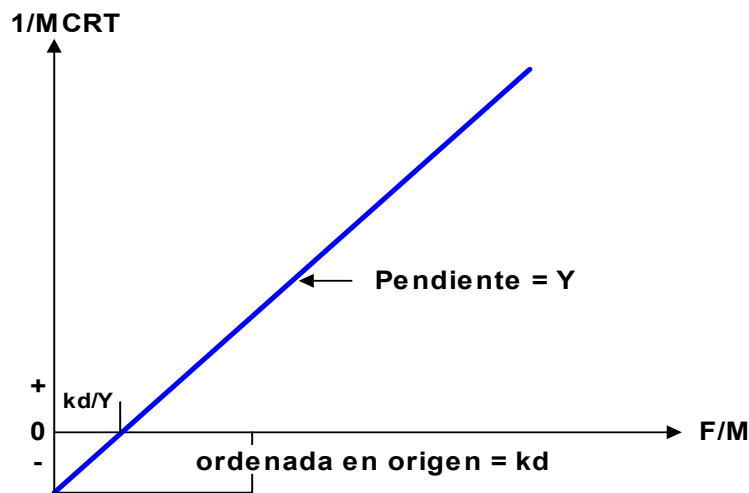


Figura 5. Representación de la ecuación de la recta  $1/MCRT = Y * F/M - kd$

El descenso de la pendiente Y implicaría que para una misma F/M, necesitaríamos un menor 1/MCRT; o sea, un mayor MCRT.

Por todo ello, en las variaciones y reajustes de DQO/N/P será conveniente la determinación periódica de Y, y el análisis de la coherencia de su relación con F/M y MCRT

### 5.4. Actividad biológica

La relación DQO/N/P se ha calculado de acuerdo al estado actual de la biomasa. Sin embargo, es muy posible que la deficiencia de nutrientes haya provocado en la biomasa una merma de su actividad biológica normal y por lo tanto, con la recuperación de los nutrientes, esta actividad puede que vaya creciendo en el tiempo. Este es un punto esencial, porque este posible aumento de actividad va a repercutir en el tiempo de depuración, en la distribución de necesidades de oxígeno y además en un posible reajuste de los valores DQO/N/P.

La comprobación del posible crecimiento de actividad biológica se debe llevar a cabo con sencillos ensayos de respirometría en modo dinámico por medio de la utilización de un sustrato standard (p.e. acetato sódico) y su respuesta respirométrica a tiempo fijo.

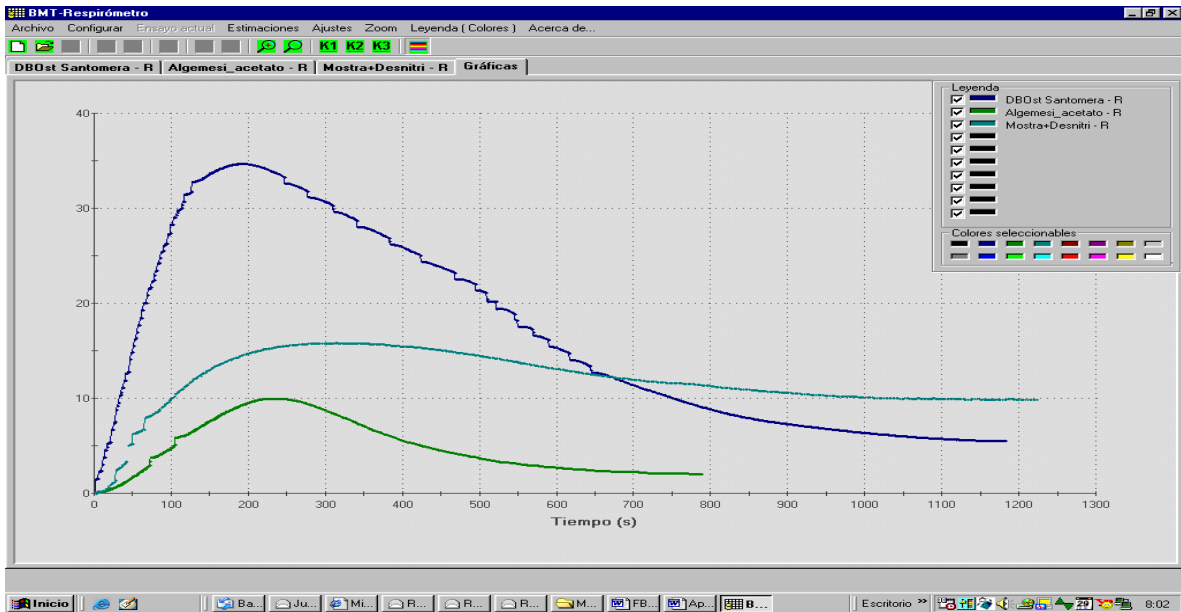


Figura 6. Diferentes niveles de actividad en varios ensayos de un mismo standard

La Figura 6 demuestra como con respirogramas obtenidos de una misma muestra standard en periodos suficientemente espaciados, el último ensayo (**azul**) nos proporciona una tasa de respiración máxima superior a la de los otros dos.

Ello demostraría que, una vez corregida la deficiencia de nutrientes, la actividad biológica de la biomasa ha crecido a lo largo del tiempo. Si así fuera, sería conveniente reajustar los valores DQO/N/P de acuerdo al procedimiento anteriormente descrito.

## 6. Decantabilidad

En caso de que no exista ningún otro problema añadido, con la recuperación de una relación coherente de nutrientes el fango progresivamente debe ir recuperando a lo largo del tiempo su valor normal de decantabilidad, con valores de IVF por debajo de 150 ml/g

Cómo guía orientativa nos podemos atener a la siguiente tabla.

### Decantabilidad de un fango activo de acuerdo con su IVF (Wanner, 1997)

Tipo de Fango	IVF (mg/l)
Buena Decantabilidad	< 100
Ligero	100 – 200
Bulking	> 200

Tabla 1

El rango de normalidad de un IVF puede situarse entre 75 y 125 ml/g.

No obstante hay que tener en cuenta que el cambio no es inmediato y que pueden existir efectos y problemas colaterales que pueden ralentizar su recuperación. Puede que incluso persistan los problemas de decantación por otras causas que pudieran coexistir con la deficiencia de nutrientes.

A modo de guía orientativa de problemas de decantación, presentamos la Tabla 2.

### **Causas y efectos de diferentes problemas registrados durante la decantación de fangos (Jenkins, 1993)**

Problema	Causas	Efectos
Crecimiento disperso	No hay biofloculación	Efluente turbio. Sedimentación difusa
Bulking viscoso	Producción excesiva de polímeros extracelulares	Baja velocidad de decantación y compactación. Formación de espumas. Salida de fangos con el efluente.
Pin-floc o Pinpoint floc	Ausencia de filamentos. Flóculos pequeños, compactos, débiles y esféricos.	IVF < 70 mg/l. Efluente turbio.
Bulking filamentoso	Exceso de filamentos	IVF < 150 mg/l. Sobrenadante claro.
Ascensión de fangos	Desnitrificación en el decantador con formación de N	Salida de fangos con efluente.
Formación de espumas	Presencia de organismos filamentosos que forman espumas	Salida de fango con las espumas junto con el efluente.

Tabla 2

Por ello, en el caso de que con el tiempo los problemas de decantabilidad persistieran, habría que hacer otro tipo de estudios y análisis.

Cuando el requerimiento de oxígeno (AOR) es coherente, en la recuperación de la decantabilidad es fundamental el seguimiento de la relación de Y con la F/M y la edad del fango (MCRT) (punto 5.3.)

## **8. Microflora de los fangos activos**

Así mismo, y siempre que no existan problemas colaterales, con la recuperación de nutrientes también debería remitir la proliferación de bacterias filamentosas.

Sin embargo, es bien conocido que la eliminación de filamentosas puede ser una tarea ardua y tediosa, y a veces debe recurrirse a su eliminación por medios externos tales como la adición de hipoclorito.

Sin embargo, la presencia moderada de microorganismos filamentosos contribuye a capturar y mantener atrapadas pequeñas partículas durante la sedimentación del fango, proporcionando así un efluente de mayor calidad.

Por ello, hay que tener en cuenta que un crecimiento equilibrado de bacterias filamentosas y bacterias formadoras de flóculos permite obtener el llamado Flóculo Ideal, en el que los filamentos se desarrollan en el interior del flóculo, proporcionándole estructura y resistencia. Un fango activo con este tipo de flóculos debe tener un IVF entre 75-125 ml/g, produciendo un efluente con escaso contenido de sólidos en suspensión (Parody, 1997)

## **Bibliografía**

- Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming, Second Edition, D. Jenkins, M.G. Richard and G. Daigger, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1993.
- A Scheme for Diagnosing Activated Sludge Filamentous Bulking Problems" by D. Jenkins, R. Ramadori, & L. Cingolany.
- Bashaar Y. Ammary (2004) - Water and Environmental Engineering Department, Balqa Applied University, Huson College (Jordan)
- Droste R L (1997). Theory and Practice of Water and Wastewater treatment, John Wiley and Sons, Inc
- Activated Sludge Treatment of Industrial Wastewater – W.W. Eckenfelder & J.L. Musterman 1995.
- RAMALHO, R.S. Introduction to Wastewater Treatment Processes. Academic Press, Second Edition, 1983.
- Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes. Second Edition. Springer. 1997.
- Universidad Resmi Sayfaları – The Influence of Nutrient Levels (COD : N : P) on Floc Formation in the Activated Sludge Processes – 2004.

Emilio Serrano  
Jefe de Producto  
SURCIS, S.L.  
Tel. 652 803 255  
E-mail: [eserrano@surcis.com](mailto:eserrano@surcis.com)  
Web: [www.surcis.com](http://www.surcis.com)