

CASOS DE ESTUDIO DE INHIBICIÓN - TOXICIDAD

RESPIROMETRÍA

Autor: Emilio Serrano

Introducción

En los procesos de fangos activos, cuando nos referimos a inhibición o toxicidad hay que dejar claro que no se trata de analizar o medir la toxicidad del agua o un determinado compuesto sino del efecto inhibitorio o tóxico que éste pueda ejercer sobre el fango activo.

Así mismo, también nos podemos referir a un estado de inhibición o toxicidad ya presente en el fango activo, sin la intervención actual del agua residual.

Por todo ello, el análisis y valoración de una inhibición o toxicidad en un proceso de fangos activos debe ineludiblemente estar referida a la actividad biológica de los microorganismos del propio fango activo y no a la de otro tipo de microorganismos que no tuvieran nada que ver con la depuración biológica de las aguas residuales.

Puesto que la respirometría es una técnica basada en la medida directa de la actividad biológica del fango activo a través de su tasa de respiración y consumo de oxígeno, podríamos afirmar sin temor a equivocarnos que se trata de la mejor herramienta que existe a la hora de analizar una inhibición o toxicidad del agua residual en el fango activo o ya presente en el mismo.

1. Inhibición y Toxicidad

La Inhibición es un concepto global que consiste en la sensible reducción de la actividad biológica del fango activo provocada por condiciones adversas (pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto,...) o por algún compuesto contenido en el agua residual. La inhibición puede considerarse como Toxicidad cuando un porcentaje de las constantes vitales de los microorganismos de la biomasa no son recuperables y se produce un efecto letal.

En el caso de que el fango activo reaccione normalmente cuando cesan las condiciones adversas o se reduce / desaparece la concentración del compuesto inhibitorio en el agua residual, el efecto podemos clasificarlo como simple Inhibición, pero sin llegar a caer en la Toxicidad.

En resumen podríamos decir que cuando se reduce la actividad biológica por influencia de las condiciones o compuesto se produce una Inhibición y esta inhibición pasa a ser Toxicidad cuando el efecto es letal y la pérdida de biomasa activa existente es irrecuperable.

Los microorganismos restantes de la biomasa afectada por Toxicidad, una vez desaparecido el efecto tóxico y en condiciones favorable, podrían sin embargo, empezar a reproducirse y adquirir cierto grado de recuperación; pero se trataría de nuevos microorganismos.

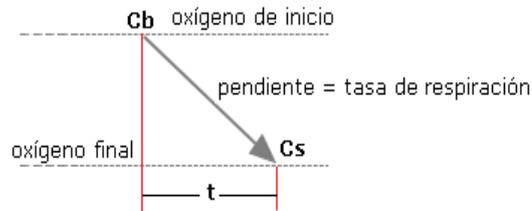
2. Conceptos preliminares

2.1. ¿Qué es la Respirimetría?

La Respirimetría es una técnica que mide el consumo de oxígeno de las bacterias contenidas en un fango activo: por sí mismas (respiración endógena) o en su fase de degradación de un sustrato orgánico o nitrógeno-amoniaco (respiración exógena)

Este consumo de oxígeno se mide principalmente bajo dos variantes:

- Tasa de respiración (velocidad de consumo)



- Oxígeno consumido (total o parcial) en la degradación de un sustrato.

La Respirimetría BM avanzada permite trabajar en tres tipos distintos de ensayos e incorpora una serie de medidas y cálculos automáticos que permiten abordar un amplio abanico de aplicaciones entre las que se encuentran las de Inhibición / Toxicidad.

		Tipos de ensayo	Medidas automáticas	Descripción
	OUR		OUR (mg O ₂ /L.h)	Tasa de respiración global
			SOUR (mg O ₂ /VSS.h)	OUR específico
	OUR cíclico		OUR (mg O ₂ /L.h)	Cadena de medidas secuenciales de OUR
			SOUR (mg O ₂ /VSS.h)	Cadena de medidas secuenciales de OUR
	R		Rs (mg O ₂ /L.h)	Medida continuada de la tasa de respiración exógena bajo condiciones de oxigenación ininterrumpida
			OC (mg O ₂ /L)	Consumo de oxígeno en la oxidación de un sustrato
			DQOb (mg/L)	DQO biodegradable (soluble o total)
			q _H (mg DQO/mgSS.d)	Tasa de remoción específica de la DQOb
			U (mg DQO/L.h)	Tasa de remoción de la DQOb

Además de las medidas y cálculos automáticos, todos los ensayos incorporan además la medida del oxígeno disuelto (OD) y temperatura (T). Así mismo, en algunos modelos de respirometros el paquete de medidas se amplía con la monitorización y control del pH y medida del Potencial Redox (ORP)

2.2. Actividad Biológica (A.B.)

En realidad los pilares básicos para la Inhibición y Toxicidad se asientan bajo el principio de la comparación de una actividad biológica (A.B.) a analizar con el valor de otra que es normal o con una tabla quía de normalidad.

Por todo ello, se ha creído conveniente aclarar los conceptos de la actividad biológica desde la perspectiva de la Respirimetría, y los parámetros asociados a la misma.

A.B. endógena

Actividad desarrollada por los microorganismos de la biomasa durante la fase endógena, en donde no existe sustrato alguno que oxidar biológicamente y los microorganismos sobreviven por sí mismos.

Las medidas respirométricas representativas de la A.B. endógena son las siguientes:

- **OUR_{end}** (mg O₂/L.h): Tasa de respiración endógena en ensayos OUR y OUR cíclico
- **Cb** (mg/L): Oxígeno disuelto representativo de la línea base utilizada en los ensayos R desde el nivel de oxígeno resultante en el fango endógeno

A.B. exógena

Actividad desarrollada por los microorganismos de la biomasa durante la oxidación de un sustrato sea este de naturaleza orgánica o amoniacal.

Las principales medidas respirométricas y parámetros derivados representativos de la A.B. exógena son los siguientes:

- **Rs** (mg O₂/L.h): Tasa de respiración exógena en ensayos R
- **q**: Tasa específica de utilización del sustrato en ensayos R
- **Y**: Coeficiente estequiométrico

A.B. global

Actividad desarrollada por los microorganismos de la biomasa durante la respiración endógena y exógena.

Las medidas respirométricas representativas de la A.B. total más representativa es la siguiente:

- **UNFED SOUR** (mg O₂/gVSS.h): Tasa de respiración específica global referida a los MLVSS en el fango efluente en ensayos OUR y OUR cíclico

3. Medidas y parámetros utilizados en Respirimetría BM para el análisis de la Inhibición / Toxicidad

En la biomasa heterótrofa

Parámetro	Descripción	Aplicación
Rs (mg O ₂ /l.h)	Tasa de respiración dinámica exógena por oxidación del sustrato degradable del agua residual.	Indicador de de inhibición / toxicidad por comparación con la Rs _{ref} de un compuesto estándar. Confirmación de una Toxicidad cuando en un ensayo R con la muestra problema, la Rs sobrepasa negativamente la línea base creada por la respiración endógena.
Rs_{ref} (mg O ₂ /l.h)	Tasa de respiración dinámica exógena, por oxidación del sustrato de un compuesto estándar de referencia.	Referencia con la que se compara con la Rs para detectar y medir el grado (%) de una posible inhibición / toxicidad en caso de que Rs sea sensiblemente inferior a la Rs _{ref}
Y_H (O ₂ /DQO)	Coefficiente estequiométrico de la biomasa heterótrofa.	Detección de una posible inhibición en la biomasa cuando su valor queda por debajo del valor mínimo del rango habitual (0,6 – 0,8)
q_H (mg DQOb/l.h)	Tasa de utilización del sustrato orgánico degradable en el agua residual	Parámetro cinético utilizado para el cálculo de la tratabilidad y de la inhibición / toxicidad por comparación con la q _{ref}
q_{H ref} (mg DQOb/l.h)	Tasa de utilización de un sustrato orgánico de referencia (acetato sódico)	Referencia con la que se compara la q _H para detectar y medir el grado (%) de una posible inhibición / toxicidad en caso de que q _H sea sensiblemente inferior a q _{H ref}
DQOlb (mg/L)	DQO lentamente biodegradable (recalcitrante)	La DQOlb de forma indirecta puede producir una inhibición en la actividad normal de la biomasa debido a la naturaleza del sustrato que alimenta a los microorganismos.

En la biomasa heterótrofa y global

Parámetro	Descripción	Aplicación
SOUR (mgO ₂ /gVSS.h)	Tasa de respiración global	Cuando se mide en el fango efluente, se puede comparar con una tabla guía de valores habituales para hacer una valoración primaria del proceso (Tomar el pulso)

En la biomasa nitrificante

Parámetro	Descripción	Aplicación
Rs_{N,max} (mg O ₂ /l.h)	Tasa de respiración dinámica exógena máxima por oxidación de un sustrato amoniacal (cloruro de amonio en concentración equivalente)	Análisis de la tasa de nitrificación por cambio de condiciones de pH, Temperatura y OD. Cuando se obtiene desde un fango endógeno que previamente ha contenido el agua residual-problema, se puede comparar con la Rs _{N,max,ref} para el análisis de la toxicidad. Base de cálculo de la Rs _N
Rs_N (mg O ₂ /l.h)	Tasa de respiración dinámica exógena por oxidación de un sustrato amoniacal obtenido a partir de la corrección de Rs _{N,max}	Base de cálculo del AUR.
Rs_{N,max,ref} (mg O ₂ /l.h)	Rs _N máxima de referencia cuando se obtiene desde un fango endógeno que no ha contenido el agua residual-problema.	Referencia con la que se compara con la Rs _{N,max} para detectar y medir el grado (%) de una posible inhibición / toxicidad en caso de que Rs _N sea sensiblemente inferior a la Rs _{N,ref}
AUR (mg N-NH ₄ /L.h)	Tasa de nitrificación	El AUR se obtiene desde la Rs _N
C_N (mg N-NH ₄ /L) o %	Capacidad de nitrificación	Representa la concentración de amonio que el proceso es capaz de tratar o el tanto por ciento sobre el máximo que es capaz de tratar.

En cualquiera de los casos, para las medidas de referencia, debemos tener en cuenta que cualquier actividad desarrollada en un fango activo que ya se encuentre bajo el efecto tóxico no se puede utilizar como referencia de normalidad. Por ello cuando el fango esté afectado por una toxicidad, los parámetros de referencia se deben obtener desde un fango de otra planta lo más parecido posible al fango del proceso.

4. Compuestos estándar utilizados en Respirimetría

Los compuestos estándar más utilizados son el acetato sódico para aplicaciones de toxicidad global y como referencia de sustrato orgánico, y el cloruro de amonio para estudios de toxicidad específica a la nitrificación y como referencia de sustrato de amonio.

Compuesto estándar	Aplicación
Acetato sódico	Determinación del coeficiente Y_H Determinación de la R_s máxima Determinación de la q_H de referencia
Cloruro de amonio	Detección de la nitrificación Determinación de la R_s máxima por nitrificación Determinación de la tasa de nitrificación

5. Otras aplicaciones de la Respirimetría

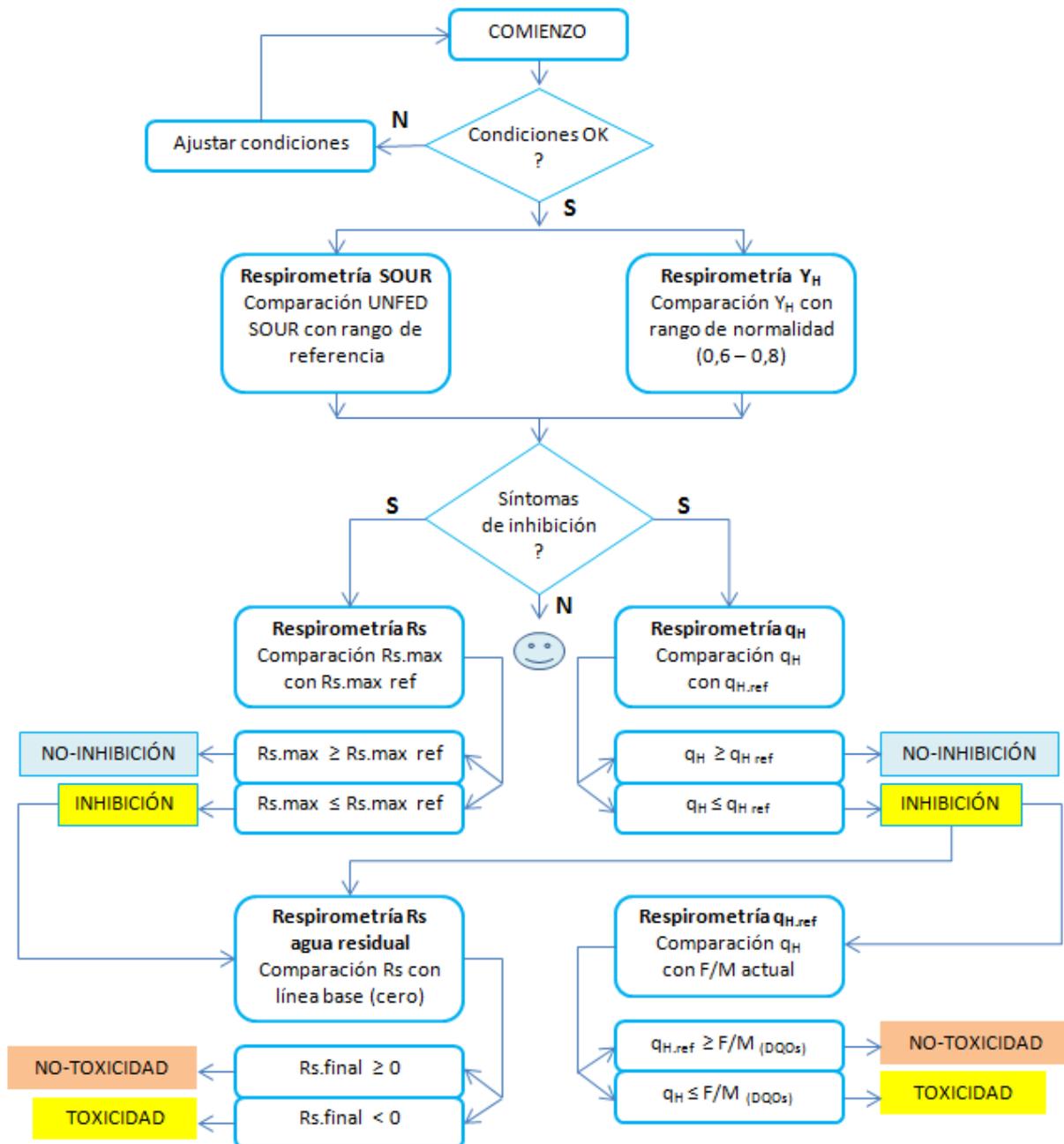
Además de la toxicidad, las aplicaciones de la respirometría más comunes se basan en los siguientes puntos:

- Rápida valoración cualitativa de la salud de la biomasa y estado del proceso.
- Optimización de la aeración y así fomentar el ahorro energético de la planta.
- Caracterización del agua a tratar en función de su biodegradabilidad por el fango activo.
- Detección de vertidos industriales con efectos inhibitorios o tóxicos sobre la biomasa.
- Optimización de la nitrificación-desnitrificación.
- Análisis de la relación de nutrientes.
- Determinación de los parámetros cinéticos.
- Determinación de los parámetros operativos límites.
- Bioaumentación
- Seguimiento de sistemas de oxidación avanzada
- Soporte a programas de simulación
- ...

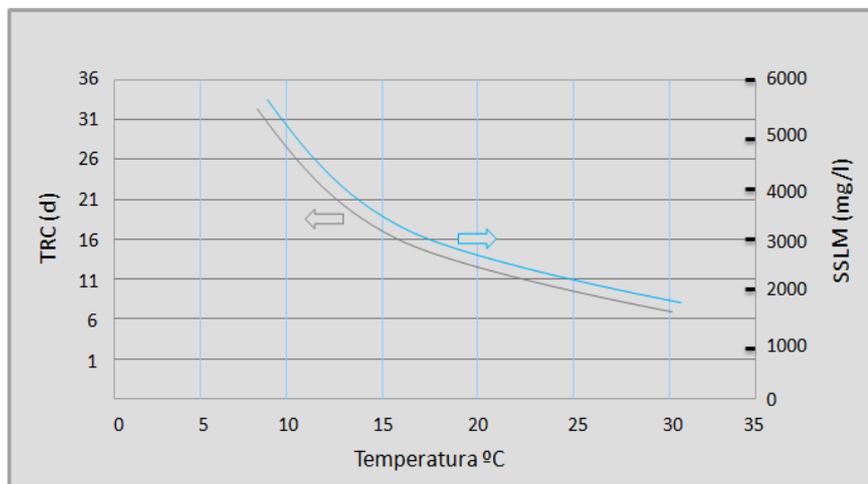
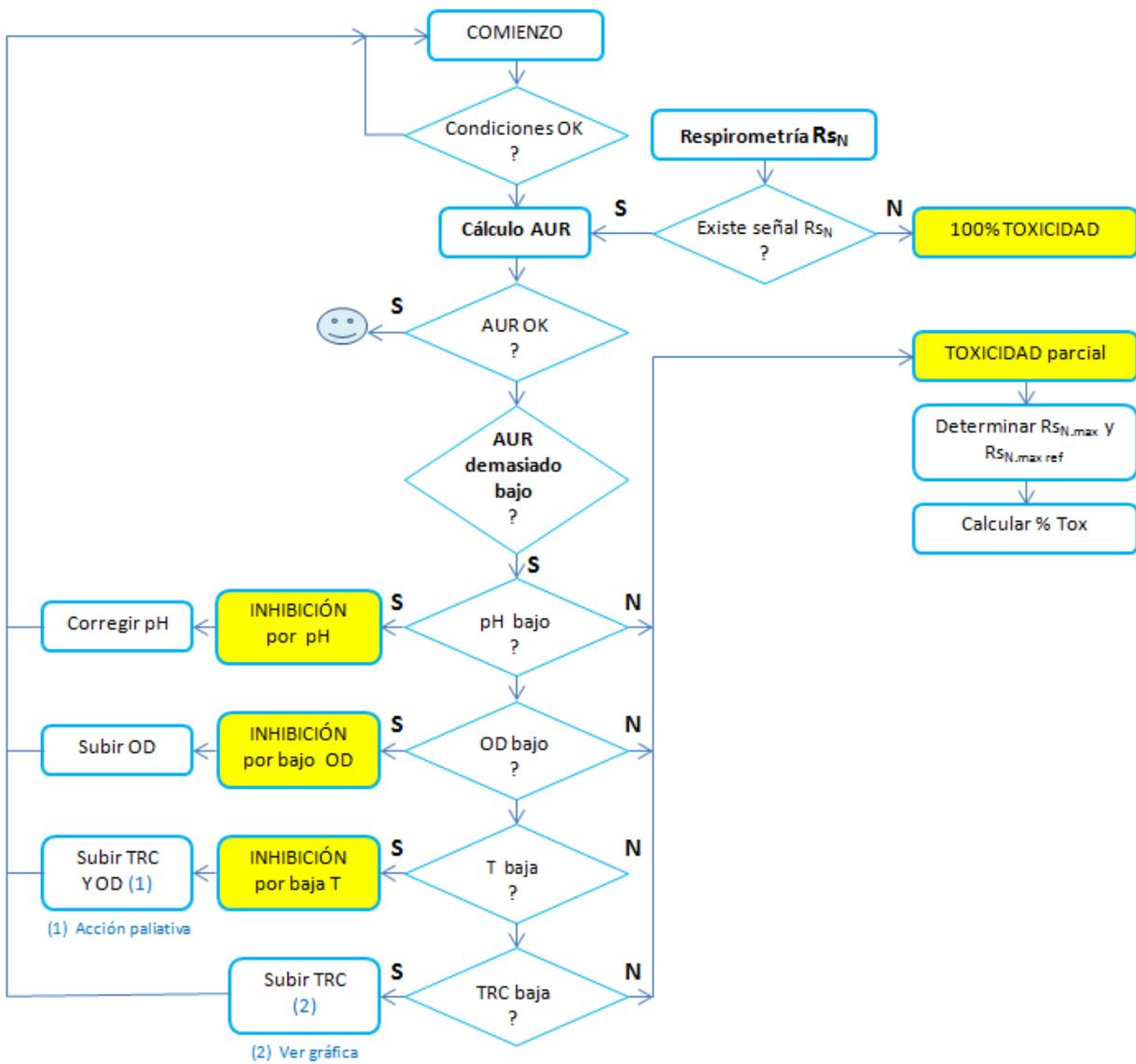
6. Protocolos para detección y confirmación de una Inhibición o Toxicidad

Puesto que existen muchos tipos de procesos y los casos de Inhibición / Toxicidad pueden adquirir distintas variantes, pueden existir distintos tipos de protocolos de actuación ante la Inhibición / Toxicidad. Aquí exponemos unos posible protocolos a seguir:

6,1, Protocolo para la biomasa global y heterótrofa



6.2. Protocolo para la biomasa autótrofa nitrificante



Gráfica guía para del TRC vs Temperatura y MLSS

7. Resumen de Casos de estudios reales en los que se detectó

Inhibición / Toxicidad

Una de las mejores formas de explicar y comprender la aplicación de la Respirimetría es por medio de casos de estudio realizados con una respirómetro de nueva generación, capaz de poder programar las condiciones de Temperatura y pH y llevar a cabo la utilización combinada de varios parámetros de respirometría.

7.1. Caso de estudio: Interlaboratorio GBS 2010

Inhibición parcial de la nitrificación por pH bajo

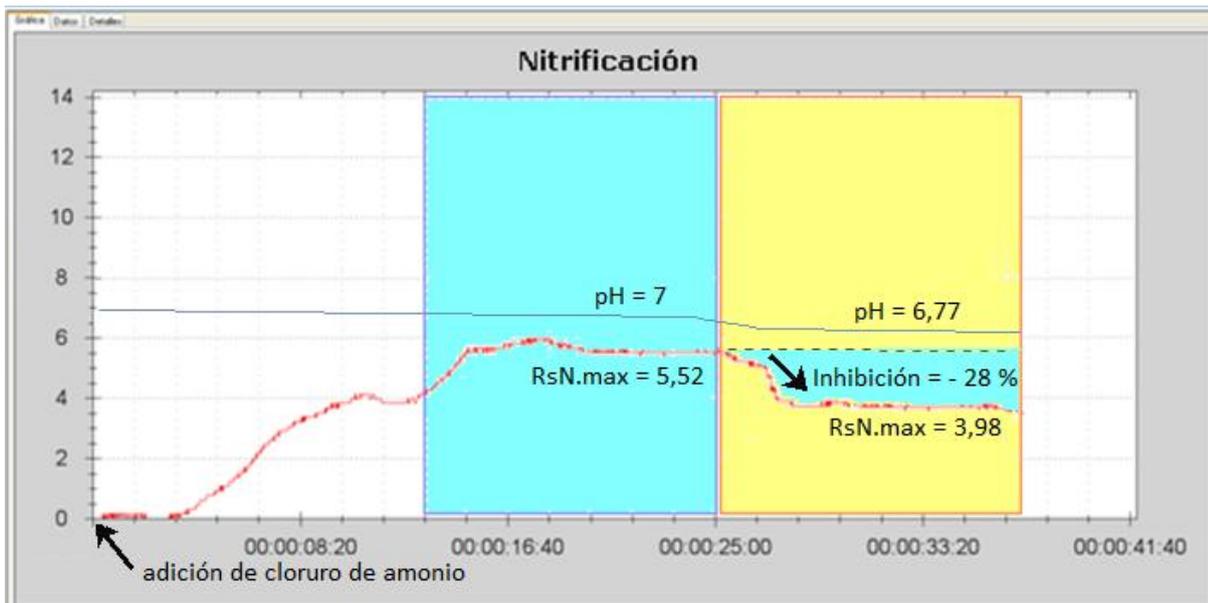
7.1.1. Datos clave para el estudio

Parámetro (valor medio)	Modo / Valor
Tipo de proceso	Canal de oxidación
Nitrificación / Desnitrificación	<u>SI/SI</u>
pH medio en zona de Nitrificación	6.77
Temperatura actual media en el biológico	19
Amonio (mg/l) medio de entrada / Salida	35±5/15±5 mg/l
MLSS / MLVSS (mg/l) medio del fango actual	2000/1350
Tiempo (h) medio de Retención Hidráulica dedicada a la Nitrificación	35
F/M: Carga Másica	0.02 0,03
Oxígeno Disuelto en biológico	2
En caso de que los fangos presenten espumas: color	Marrón oscuro

7.1.2. Tasa de respiración por nitrificación (R_{sN})

Desde el análisis de los datos clave del proceso, creemos conveniente dirigir el estudio hacia el efecto que produce el pH en la actividad biológica del proceso.

Para ello, se lleva a cabo un ensayo R en donde al fango endógeno se le añade una dosis de cloruro de amonio equivalente para determinar el valor de la tasa de respiración máxima ($R_{sN,max}$) que corresponde a dos niveles consecutivos de pH que se varía e forma automática desde el propio respirómetro BM.



$$R_{S_N, \max} (\text{pH } 7) = 5,54 \text{ mg/L.h}$$

$$R_{S_N, \max} (\text{pH } 6,77) = 3,98 \text{ mg/L.h}$$

7.1.3. Tasa de nitrificación (AUR) al OD actual (2 ppm)

$$AUR (\text{pH } 7) = F_{OD} * R_{S_N, \max} (\text{pH } 7) / 4,57 = 0,8 * 5,54 / 4,57 = 0,97 \text{ mg N-NH}_4/\text{L.h}$$

$$AUR (\text{pH } 6,77) = F_{OD} * R_{S_N, \max} (\text{pH } 6,77) / 4,57 = 0,8 * 3,98 / 4,57 = 0,69 \text{ mg N-NH}_4/\text{L.h}$$

Factor de corrección por OD: $F_{OD} = OD / (0,5 + OD) = 2 / 2,5 = 0,8$

7.1.4. Capacidad de nitrificación (C_N) y rendimiento estimado (E_N) al OD actual (2 ppm)

Desde los valores AUR al OD actual y el tiempo de retención hidráulica disponible para la nitrificación (según dato aportado) calculamos la capacidad de nitrificación teórica

$$C_N (\text{pH } 7) = 0,97 * 35 \approx 34 \text{ mg N-NH}_4/\text{L}$$

$$C_N (\text{pH } 6,77) = 0,69 * 35 = 23 \text{ mg N-NH}_4/\text{L}$$

Rendimiento estimado nitrificación a pH 7: $E_N (\text{pH } 7) = 100 * [1 - (35 - 34)/35] = 97 \%$
 Rendimiento estimado nitrificación a pH 6,77: $E_N (\text{pH } 6,77) = 100 * [1 - (35 - 23)/35] = 66 \%$

7.1.5. Tasa de nitrificación (AUR') a OD igual o superior a 2,5 ppm

$$AUR' (\text{pH } 7) = F_{OD} * R_{S_N, \max} (\text{pH } 7) / 4,57 = 1 * 5,54 / 4,57 = 1,21 \text{ mg N-NH}_4/\text{L.h}$$

$$AUR' (\text{pH } 6,77) = F_{OD} * R_{S_N, \max} (\text{pH } 6,77) / 4,57 = 1 * 3,98 / 4,57 = 0,87 \text{ mg N-NH}_4/\text{L.h}$$

Factor de corrección por OD: $F_{OD} = 1$ (cuando $OD \geq 2,5$)

7.1.6. Capacidad de nitrificación (C'_N) y rendimiento estimado (E'_N) a OD igual o superior a 2,5 ppm

Desde los valores AUR al OD $\geq 2,5$ ppm y el tiempo de retención hidráulica disponible para la nitrificación (según dato aportado) calculamos la capacidad de nitrificación teórica

$$C'_{N(pH\ 7)} = 1,21 * 35 \approx 42 \text{ mg N-NH}_4/\text{L}$$

$$C'_{N(pH\ 6,77)} = 0,87 * 35 = 30 \text{ mg N-NH}_4/\text{L}$$

$$\text{Rendimiento estimado nitrificación a pH 7: } E'_{N(pH\ 7)} = 100 \%$$

$$\text{Rendimiento estimado nitrificación a pH 6,77: } E'_{N(pH\ 6,77)} = 100 * [1 - (35 - 30)/35] = 85 \%$$

7.1.7. Conclusiones

1. Existe un claro descenso de la tasa de nitrificación y capacidad de nitrificación al pasar el pH de 7 al valor medio de 6,77 con que el proceso está operando.
2. Esta bajada se puede considera como de efecto inhibitorio que produce la influencia del bajo pH en el proceso de la nitrificación.
3. Con el pH medio actual, la capacidad de nitrificación que se obtiene nos da un rendimiento aproximado del 66% (que más o menos coincide con el dato aportado en la ficha técnica)
4. Simplemente con la subida del pH al valor 7 de referencia, la capacidad de nitrificación sería suficiente para obtener un rendimiento estimado del 97%
5. Matemáticamente se demuestra que la forma de paliar el bajo rendimiento de la nitrificación, conservando el pH actual, sería la de subir el nivel de oxígeno disuelto a valores iguales o superiores a 2,5 ppm.

7.2. Caso de estudio: 2º Interlaboratorio-GBS 2012

Inhibición producida por el agua residual

7.2.1. Descripción de las principales características específicas, peculiaridades y problema en el proceso de depuración.

La planta está diseñada con objeto de ocupar el mínimo espacio posible y al ser compacta presenta dos variaciones del diseño normal que afecta al funcionamiento y operación de la misma de forma importante.

La aireación presenta dos zonas: contacto, donde entran en contacto el agua a tratar y la recirculación, si se trabajase en modo contacto-estabilización y estabilización, donde llega la recirculación en cualquier caso y al operar en flujo pistón también llega el agua de salida de primarios. En contacto la aireación puede ser más alta que en estabilización, por diseño. La línea de fangos se opera de modo que el fango deshidratado salga de centrifuga con una sequedad para que sea auto-combustible y para ello se controla la mezcla de fango primario y secundario ambos espesados.

Además el humo se depura en un lavador de gases tipo scrubber cuyas purgas van directamente a cabeza sin tratamiento, con elevados valores de sulfatos y sulfitos, que aportan gran septicidad al agua a tratar de nuevo en la EDAR.

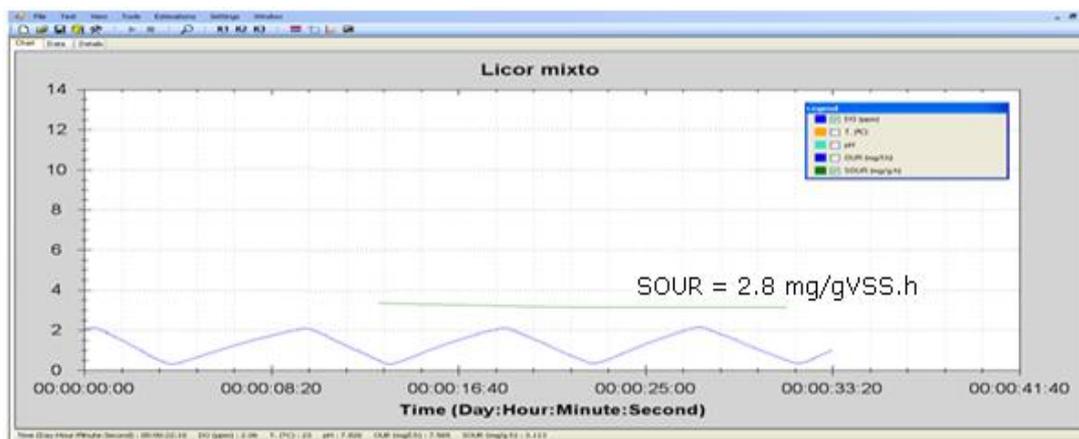
Como consecuencia del complejo tratamiento del agua (influyente + retornos), el fango activo presenta siempre una importante defloculación y poca densidad de protozoos y solo se llega a oxigenar bien, con bajas cargas influentes, se empieza a observar correcta floculación.

7.2.2. Datos clave para el estudio

Parámetro (valor medio)	Modo / Valor
Tipo de proceso	Contacto – estabilización
Nitrificación	No
Temperatura actual media en el biológico / día / noche	23 °C
MLSS / MLVSS (mg/l) medio del fango actual	2.86 g/l y 85,4 % MV
Θ media: Edad del Fango (d)	3 d
F/M: Carga Másica	0.24 DBO ₅ / MLSS.d
IVF (mg/l) media	93 mg/l
Oxígeno Disuelto en biológico inicio – medio – final	1 ppm – 0.8 ppm y 0.3 ppm

7.2.3. Pulso al proceso

Por las características de la problemática se decide tomar el pulso del proceso por medio de un ensayo cíclico del licor-mixto de cabeza, en condiciones equivalentes de temperatura, pH y oxígeno disuelto medio. En este ensayo analizamos el valor SOUR en su nivel más estable.



Respirograma OD & SOUR

Si comparamos el valor de 2,8 de SOUR con los valores típicos del final de este tipo de proceso, podemos ver que este valor (UNFED SOUR) queda por debajo del rango normal. Ello nos quiere decir que el proceso se está desarrollando bajo condiciones de muy baja actividad. Las razones por las que normalmente esto puede suceder pueden ser las siguientes: muy baja carga en la entrada (que no es el caso) o que existe un efecto de inhibición o toxicidad.

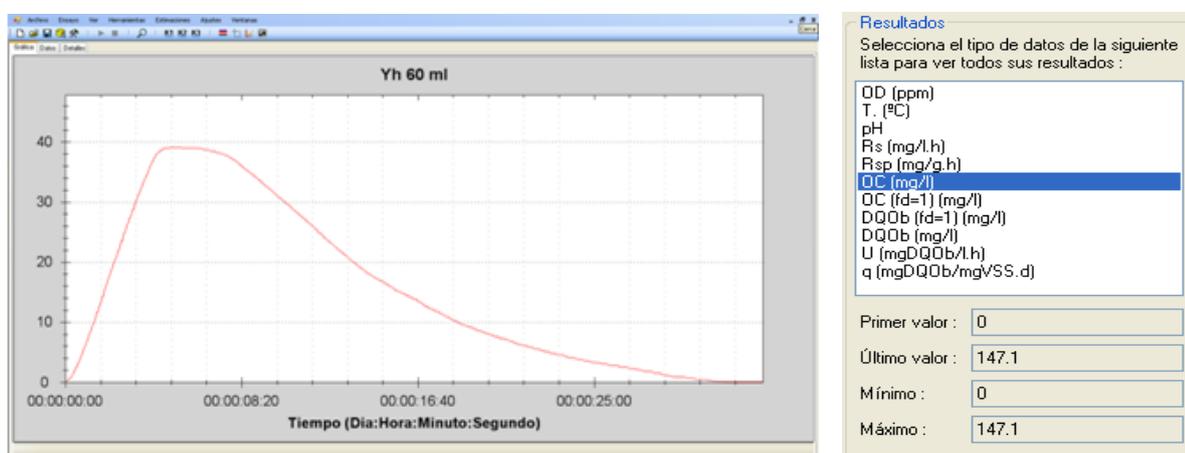
Carga Másica F/M DBO/SS.d	TRC d	UNFED SOUR Referencia mg O ₂ /g.h
> 0.4	2 - 4	6 - 18
0.2 < F/M < 0.4	4 - 10	4 - 15
0,07 < F/M < 0.2	10 - 30	3 - 12
< 0,07	10 - > 30	2 - 6

Tabla guía del UNFED SOUR vs F/M

7.2.4. Coeficiente de rendimiento de la biomasa heterótrofa: Y_H

El coeficiente estequiométrico Y_H representa tanto por uno de demanda de oxígeno hacia el crecimiento de la biomasa.

En respirometría, uno de los métodos más utilizados para la determinación de la Y_H es mediante un ensayo R en donde se utiliza una solución estándar de acetato sódico. En nuestro caso utilizamos una solución con una DQO conocida de 300 mg/l (DQO_{ac})



Respirograma y resultados de Rs para Y_H

$$Y_{H,DQO} = 1 - OC / DQO_{ac} = 1 - 147 / 300 = 0,5 \quad Y_{H,DQO} = 0,5 (O_2/DQO)$$

El valor de la Y_H está algo bajo para un rango habitual (0,6 – 0,8). En este caso, dada la buena actividad desarrollada por la biomasa frente al acetato sódico (Rs máxima = 39 mg O₂/l.h) nos indica que el causante es el agua residual y que la biomasa sigue teniendo potencial para su recuperación..

7.2.5. Tasa de utilización del sustrato de referencia: q_{H.ref}

Para validar un sustrato de referencia y también averiguar si se trata de una inhibición o toxicidad, realizamos un ensayo R con una solución estándar de acetato sódico de DQO representativa (300 mg/l) y analizamos el valor de la tasa específica de remoción de sustrato (q_H)



Respirograma y resultados del valor de la q en ensayo R del acetato sódico

DBO/DQOs \approx 1,4

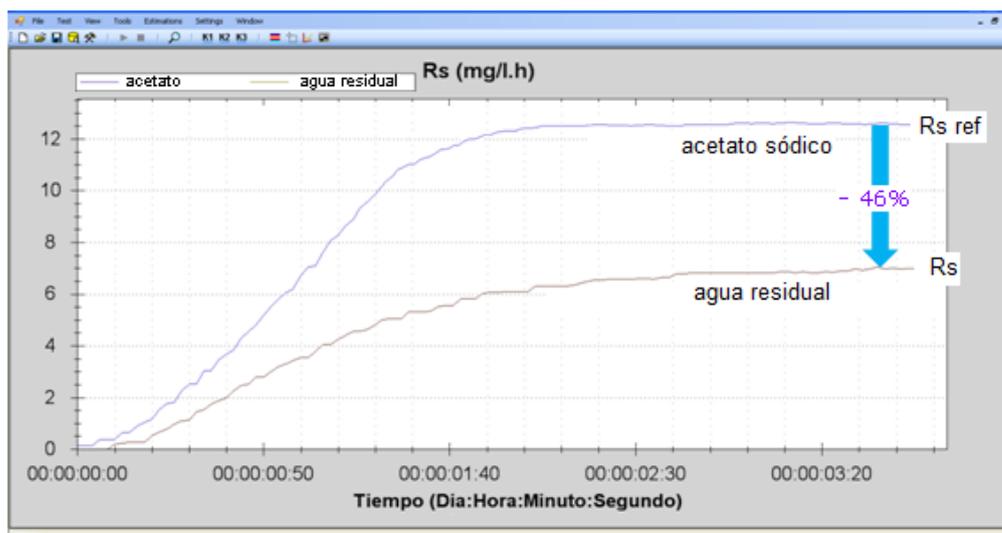
$q_{H.ref}$ medio = 0,45 mg DQOs / (mg SSV.d) \approx 0,63 mg DBO / (mg SS.d)

El valor medio de $q_{H.ref}$ es superior a la carga másica (F/M) actual de 0,24 DBO / (mg SS.d). Por lo tanto, podemos confirmar que la actividad por acetato se puede tomar perfectamente como referencia. Por otro lado, al responder el fango con una buena actividad frente al acetato sódico, se confirma que la biomasa no se encuentra bajo efectos tóxicos.

7.2.6. Confirmación del efecto de inhibición causada por el agua residual

Para esta aplicación se llevan a cabo dos ensayos respirométricos R dinámicos para medir el valor de R_s de referencia ($R_s ref$), por medio de una solución de acetato sódico con una concentración de DQO soluble similar a la del agua residual; y otro con la muestra problema de agua residual de entrada a biológico para igualmente medir su R_s máxima (R_s). Ambos ensayos se realizan en condiciones equivalentes de temperatura y pH.

Una vez realizados, se comparan por medio de la superposición de los respirogramas y se analiza la desviación porcentual entre ambas tasas de respiración ($R_s ref$ vs R_s).



Superposición de respirogramas para comparación de R_s del agua residual con la referencia

Asumimos que la tasa de respiración máxima en el acetato sódico corresponde al 100% de actividad normal en la biomasa; y que el porcentaje de descenso del valor de la tasa de respiración máxima en el agua residual respecto al valor de referencia representa el % de inhibición.

$$I (\%) = 100 * (R_{s \text{ [acetato]}} - R_{s \text{ [agua residual]}}) / R_{s \text{ [acetato]}} = 100 (13 - 7) / 13 \approx 46$$

$$I = 46 \%$$

Con esta aplicación se comprueba que en el agua residual existe un agente inhibidor de la actividad biológica del proceso con un descenso de actividad cercano al 50% (aguda)

7.2.7. Conclusiones

1. A pesar del deterioro del fango, éste no parece presentar síntomas de toxicidad ante un compuesto estándar de referencia.
2. Los microorganismos presentan un bajo nivel de crecimiento debido al efecto del agua residual.
3. El proceso sufre una fuerte inhibición por efecto del agua residual que además es la causante de la defloculación del fango.

7.3. Caso de estudio: 2º Interlaboratorio-GBS 2013

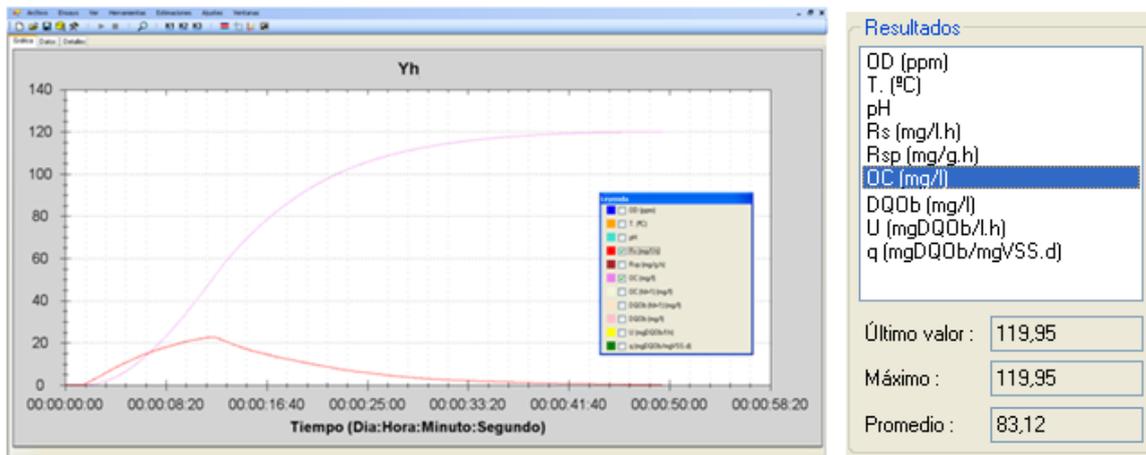
Baja velocidad de degradación de la DQO debido a la naturaleza del agua residual a tratar por el proceso

Datos clave para el estudio

Parámetro (valor medio)	Modo / Valor
Tipo de proceso	Fangos convencionales. Flujo pistón
Nitrificación	No
Temperatura actual media en el biológico / día / noche	20 °C
MLSS / MLVSS (mg/l) medio del fango actual	1.78 g/l y 1,51g/l
Θ media: Edad del Fango (d)	2,4 d
F/M: Carga Másica	0.46 DBO ₅ / MLSS.d
IVF (mg/l) media	112 mg/l
Oxígeno Disuelto en biológico	2,2 ppm

8.2.2. Coeficiente de rendimiento de la biomasa heterótrofa: Y_H

La Y_H se determina mediante un ensayo de respirometría utilizando una solución estándar de acetato sódico de 270 mg/l de DQO (DQO_{ac}) y fango activo libre de sustrato. En nuestro caso se utilizó fango de recirculación en respiración endógena preparado para el caso.



Respirograma y resultados de Rs para Y_H

$$Y_{H,DQO} = 1 - OC / DQO_{ac} = 1 - 120 / 270 = 0,55 \quad Y_{H,DQO} = 0,55 (O_2/DQO)$$

El valor de la Y_H está algo bajo para un rango habitual (0,6 – 0,8). Este resultado nos dice que el porcentaje de DQO destinado al crecimiento de la biomasa está algo bajo y ello puede ser por la propia biomasa o por la naturaleza del agua residual.

8.2.3. Tasa de utilización de sustrato de referencia: $q_{H,ref}$

Gracias a los cálculos automáticos desarrollados por el software BM, podemos aprovechar el mismo ensayo de la determinación de la Y_H para obtener el resultado de la tasa de utilización de sustrato que nos puede servir para seguir valorando la actividad biológica con un estándar orgánico (acetato sódico)



Respirograma y resultados de la q_H de referencia

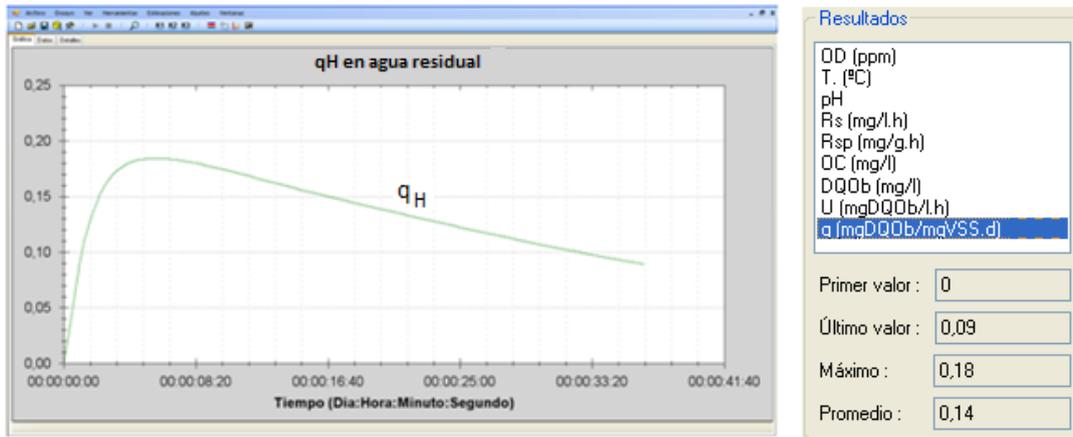
$$DBO/DQOs \approx 1,4$$

$$q_{H,ref} \text{ medio} = 0,39 \text{ mg DQOs} / (\text{mg SSV.d}) \approx 0,54 \text{ mg DBO} / (\text{mg SSV.d})$$

El valor medio de $q_{H,ref}$ es superior a la F/M actual (0,46).

Por lo tanto, podemos confirmar que la actividad por acetato se puede tomar perfectamente como referencia. Por otro lado, al responder el fango con una buena actividad frente al acetato sódico, se confirma que la biomasa no se encuentra bajo efectos tóxicos.

8.2.4. Tasa de utilización de sustrato del agua residual: q_H



Respirograma y resultados de la q_H de referencia

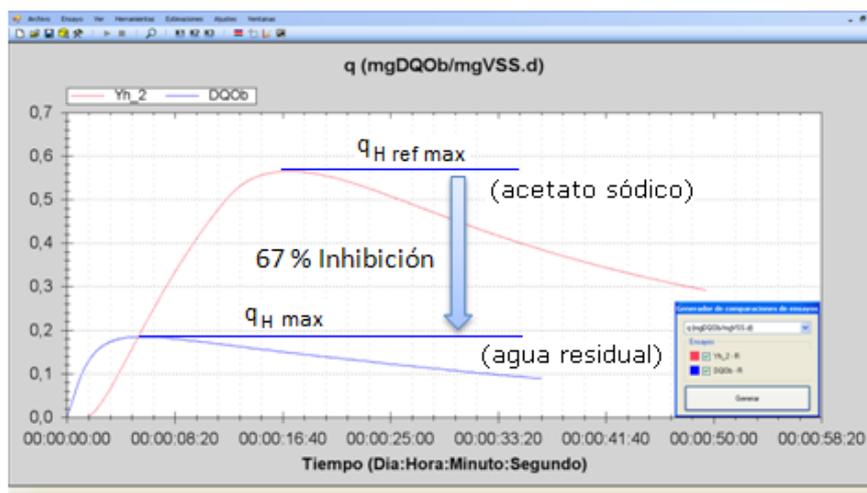
$$q_{H, \text{ medio}} = 0,18 \text{ mg DQOs} / (\text{mg SSV} \cdot \text{d}) \approx 0,25 \text{ mg DBO} / (\text{mg SS} \cdot \text{d})$$

El $q_{H, \text{ medio}}$ se sitúa por debajo de la F/M. actual (0,46)

Por lo tanto, se confirma que la actividad de la biomasa actual es baja frente al agua residual a tratar y, al ser inferior a la carga másica, traerá como consecuencia un bajo rendimiento en el proceso.

8.2.5. Tasa de utilización máxima de sustrato $q_{H \text{ max}}$ del agua residual comparada con al $q_{H \text{ ref max}}$ del estándar de acetato sódico

Desde el ensay R con agua residual, con los cálculos automáticos desarrollados por el software BM, obtenemos los resultados de la tasa de utilización de sustrato que nos puede servir para seguir valorando la actividad biológica con el agua residual.



Superposición de respirogramas q_H para la valoración del % de Inhibición

$$I = 100 (0.56 - 0.18) / 0.56 = 67 \%$$

Al comparar el valor de q del agua residual (q_H) con el del acetato ($q_{H \text{ ref}}$) se ve claramente el efecto inhibitorio que provoca el agua residual en su carácter biodegradable frente al fango activo, llegando a una inhibición del 67 %. Todo ello indica que la biomasa del fango se encuentra relativamente en buen estado de actividad (pero con baja reproducción por falta de alimento soluble fácilmente biodegradable) Sin embargo, la bajada estrepitosa de la q del agua residual, nos indica que el problema del bajo rendimiento viene exclusivamente por la naturaleza del agua residual acosada por el efecto de un vertido continuado.

8.2.6. Conclusiones

1. Un posible vertido continuado cambia la naturaleza del agua residual, reduciendo drásticamente su carácter biodegradable y pasándola a muy lentamente biodegradable / inerte (con el estudio actual no se puede diferenciar) que es la causante del bajo rendimiento en el proceso de depuración biológica.
2. La actividad del fango activo frente a un estándar de acetato sódico es normal. Lo cual nos demuestra que la inhibición se produce exclusivamente por la reacción del agua residual con el fango activo.

8.3. Caso de estudio: 1^{er} Interlaboratorio-GBS 2015

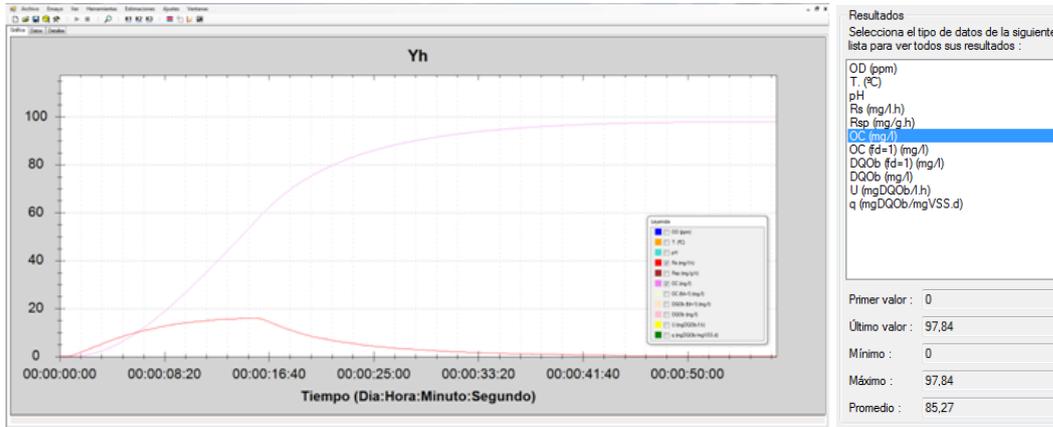
No se proporcionó descripción del problema. Sin embargo, se intuye un bajo rendimiento en un proceso de bulking filamentoso.

8.3.1. Datos clave para el estudio

Parámetro (valor medio)	Modo / Valor
Tipo de proceso	4 balsas paralelas con turbinas. Flujo pistón
Nitrificación	No
Zona anóxica	37% - sólo agitación para evitar sedimentación
Temperatura actual media	15 °C
DQO media de entrada	444 mg/L
MLSS / MLVSS	1800 mg/L / 1422 mg/L
Θ media: Edad del Fango (d)	5 d
IVF (mg/l) media	160 mg/l
Oxígeno Disuelto en biológico	3 ppm (al final de la balsa)
Grasas - Aceites	Sí
Espumas	Sí – Color marrón

8.3.2. Coeficiente de rendimiento de la biomasa heterótrofa: Y_H

La Y_H se determina mediante un ensayo de respirometría utilizando una solución estándar de acetato sódico de 300 mg/l de DQO (DQO_{ac}) y fango activo libre de sustrato. En nuestro caso se utilizó fango de recirculación en respiración endógena preparado para el caso.



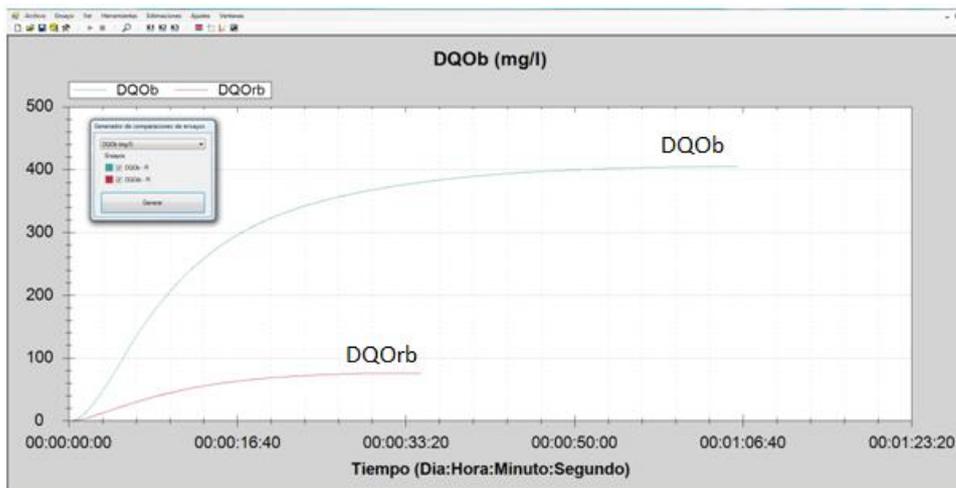
Respirograma y resultados de R_s para Y_H

$$Y_H = 1 - OC / DQO_{ac} = 1 - 97,64 / 300 = 0,67 \text{ (O}_2\text{/DQO)}$$

El valor de la Y_H es normal. Esto quiere decir que la reproducción de la biomasa es normal y confirma que la biomasa activa se encuentre dentro del rango normal de concentración sin estar afectada por toxicidad alguna.

8.3.3. QO lentamente biodegradable en DQO: % DQO_{lb}

Por medio de ensayos R determinamos la DQO_b y DQO_{rb} y sus porcentajes en la DQO total.



Superposición de respirogramas de la DQO_b y DQO_{rb}

$$\% DQO_{lb} = \% DQO_b - \% DQO_{rb} = 91 - 18 = 73$$

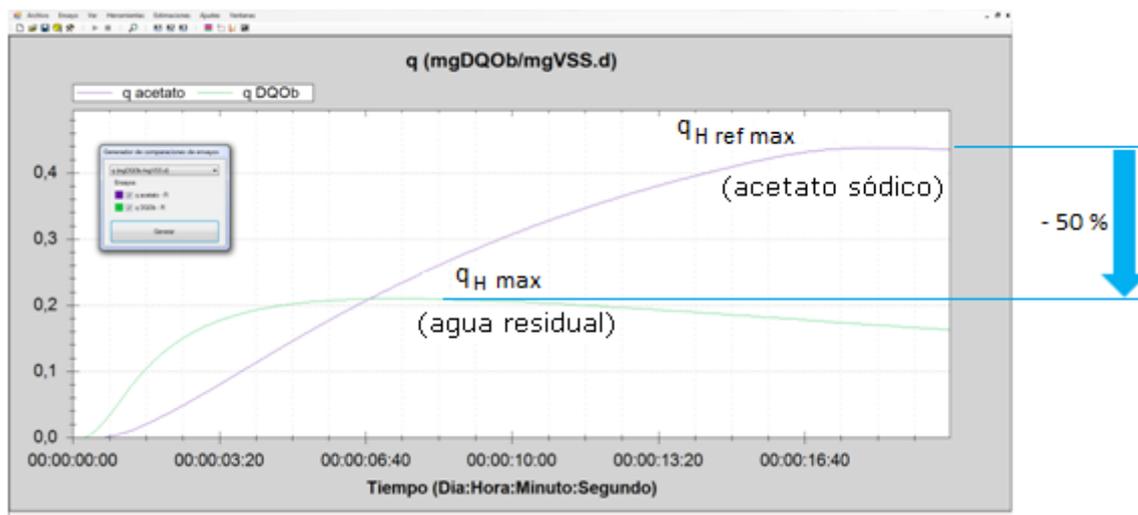
El 73 % de DQO_{lb} en la DQO total se sitúa por encima del rango habitual (40 – 65 % de la DQO) en aguas residuales urbanas.

Cuando la velocidad de degradación de la DQO es muy lenta, como es el caso de aceites y grasa (DQO recalcitrante), el hecho de tener un elevado porcentaje de DQO lentamente biodegradable adquiere una especial relevancia al correr por el posible riesgo de un bajo rendimiento debido que el tiempo de residencia hidráulica en el reactor biológico puede quedarse corto.

Por otro lado, este tipo de DQOlb que proviene de aceites y grasa, puede favorecer el crecimiento de bacterias filamentosas típicas que deriva en un bulking típico.

8.3.4. Comparación de la tasa de utilización máxima de la DQO del agua residual con la de la DQO de un sustrato estándar

La tasa específica de utilización o remoción de la DQO (q_H) nos indica la velocidad con la que la DQO biodegradable está siendo eliminada referida a los SSLM. Con el fin de analizar y valorar esta velocidad de degradación de la DQO provocada, se llevan a cabo dos ensayos R dinámicos: uno con agua residual y el de referencia con acetato sódico. En ambos ensayos, se utilizará una misma carga másica en el reactor del respirómetro.



Superposición de respirogramas q_H para la valoración del % de Inhibición

En la superposición de los respirogramas de las tasas de utilización de sustrato, se observa de forma inequívoca que la q_H máxima del compuesto estándar de referencia (acetato sódico) es muy superior a la de la DQOb del agua residual. Por esta razón, se confirma y demuestra que la causa de la baja actividad y ralentización de la degradación de la DQO proviene del agua residual y no de la biomasa del fango activo.

El efecto de una baja actividad biológica es debido al elevado porcentaje de DQOlb en la DQOb y, por lo tanto en la DQO total (posible elevada concentración de aceites y grasas)

8.3.5. Edad del fango

Tal y como ya hemos comentado en puntos anteriores, la ralentización que el proceso está sufriendo es debido a la naturaleza del agua residual y más concretamente a la presencia de una un elevado porcentaje de DQO lentamente biodegradable.

Según fuentes bibliográficas fiables y reconocidas (ver Anexo), una de las medidas a adoptar para paliar el problema de los efectos ocasionados por la DQO lentamente biodegradable recalcitrante es el reajuste de la edad del fango. Por esta razón, el cálculo de este parámetro desde la respirometría adquiere una especial importancia.

El parámetro cinético q_H es directamente proporcional a la carga másica e indirectamente proporcional a la edad del fango. Desde esta perspectiva, la determinación de la edad del fango para el problema provocado por la elevada DQOlb debe realizarse a partir de la relación de la q_H máxima de la DQOb del agua residual actual con la q_H máxima del acetato de referencia.

$$TRC = (q_{H \max}) * (TRC \text{ actual}) / (q_{H \text{ ref max}}) = 0,22 * 5 / 0,44 = 2,5 \rightarrow 3 \text{ d (entre 2 y 3 días)}$$

La reducción de la edad del fango al valor de 3 d es coherente con una de las primeras medidas temporales que se deben llevar a cabo para paliar el problema del bulking provocado por la DQO lentamente biodegradable. Por ello, ante la situación actual, podemos considerar que la edad del fango actual (5 d) está favoreciendo las condiciones del problema actual.

La medida de reducir la edad del fango a 3 días, no debe ser aislada y se debe ejecutar dentro de un paquete de otras medidas típicas de la situación actual: estabilizar el oxígeno en el reactor, evitar zona anóxica en el inicio del proceso, reducir los SSLM en el reactor

8.3.6. Conclusiones

1. El valor normal de Y_H (0,67) y la buena respuesta del fango activo al compuesto estándar de referencia (acetato sódico) nos confirma que el fango no se encuentra bajo efectos tóxicos..
2. Se detecta una elevada fracción de DQO particulada lentamente biodegradable (DQOlb)
3. La presencia de la elevada DQOlb en la DQO provoca una baja actividad biológica, que comparada con la actividad del acetato sódico se traduce en un descenso del 50 %
4. La combinación de la temperatura de 15°C con el elevado % de DQOlb se convierte en el promotor principal del bulking fiamentoso.
5. El elevado % de DQOlb, junto con zona anóxica al inicio del proceso y oxígeno disuelto irregular favorece la desestabilización del proceso y el bajo rendimiento.
6. Por los cálculos efectuados y según documentación bibliográfica (ver Anexo), la edad del fango temporal (TRC) para empezar a paliar la situación actual debe situarse entre 2 - 3 días.
7. Una vez solucionado el problema y desaparecida la presencia de la DQO recalcitrante, se podrá volver a los valores TRC y F/M habituales.

8.3.7. Anexo - Fuentes bibliográficas:

Fuente: Practical Control Methods for Activated Sludge Bulking and Foaming - Michael Richard, Ph.D., The Sear-Brown Group, Fort Collins, CO Corporate Office: Rochester, NY

The most used control method for foaming is to reduce the system MCRT, but this is variable and somewhat temperature dependent. Plants in warmer climates have had to reduce the MCRT to < 3 days for *Nocardia* control.

Fuente: Bulking - Álvaro Huete Chávez – Universidad Juan Carlos I – Ingeniería T. Industrial – 2005

Grupo F: microorganismos formadores de espumas (*Nocardia*, *Nostocoida limicola*, *Microthrix parvicella*, tipos 0041 y 0675). Las bacterias filamentosas de este grupo son capaces de producir biosurfactantes, lo que produce una espuma viscosa y estable, de color marrón, al quedar atrapadas gotitas de aceite y burbujas de gas. Su principal causa es una edad del fango elevada, condiciones en las que *Nocardia* compite ventajosamente en condiciones de bajo F/M. Por lo tanto, la mejor manera de combatirla en plantas de tratamiento convencionales es disminuir el tiempo de retención celular. En plantas con eliminación de nutrientes, en las que esta medida puede perjudicar la eliminación de nutrientes, se pueden emplear técnicas como el uso de zonas de regeneración.

8.4. Caso de estudio: 2º Interlaboratorio-GBS 2015

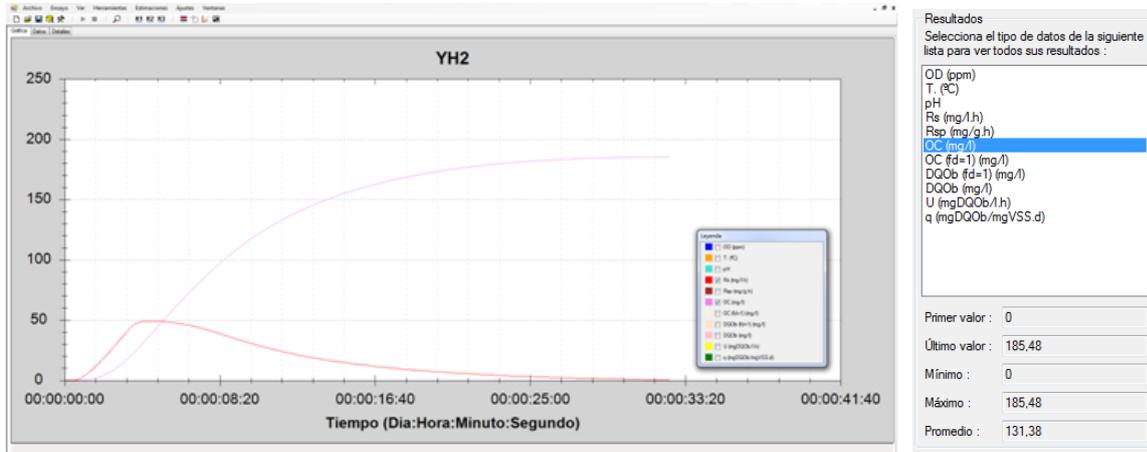
Toxicidad

8.4.1. Datos clave para el estudio

Parámetro (valor medio)	Modo / Valor
Tipo de proceso	Flujo pistón
Nitrificación	No
Temperatura actual media	17 °C
DQO media de entrada	240 mg/L
MLSS	2200 mg/L
Θ media: Edad del Fango (d)	2,5 d
IVF (mg/l) media	450 mg/l
Oxígeno Disuelto en biológico	3,5 ppm (en todo el biológico)
Grasas - Aceites	Sí
Espumas	Color marrón – Espumas de Nocardia

8.4.2. Coeficiente de rendimiento de la biomasa heterótrofa: Y_H

La Y_H se determina mediante un ensayo de respirometría utilizando una solución estándar de acetato sódico de 300 mg/l de DQO (DQO_{ac}) y fango activo libre de sustrato. En nuestro caso se utilizó fango de recirculación en respiración endógena preparado para el caso.



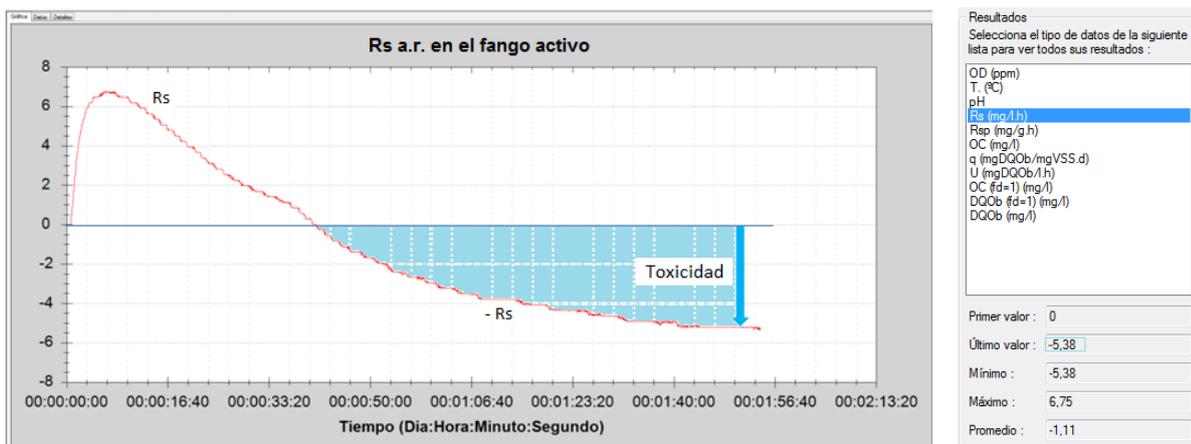
Respirograma y resultados de R_s para Y_H

$$Y_{H,DQO} = 1 - OC / DQO_{ac} = 1 - 185 / 300 = 0,38 \text{ (O}_2\text{/DQO)}$$

El valor de la Y_H está muy por debajo del rango de normalidad (0,6 – 0,8). Esto nos indica que la biomasa actual tiene una baja capacidad de reproducirse y un claro síntoma de posible Inhibición / Toxicidad.

8.4.3. Efecto del agua residual en el fango activo

Para averiguar el posible efecto tóxico que ejerce el agua residual en el fango activo, llevamos a cabo un ensayo R en donde se activa la opción de poder medir valores negativos de R_s cuando su valor se sitúa por debajo de la línea base..



Respirograma de R_s programado para detectar valores R_s negativos

En el respirograma de la tasa de respiración dinámica R_s , se observa que su valor rebasa negativamente la línea base ($R_s = 0$). correspondiente a la respiración exógena cero del fango en respiración endógena (línea base). Una vez rebasa la línea base, el valor de R_s pasa a situarse alrededor de $-5,4$ mg/L.h.

Al rebasar la línea base, la tasa de respiración que se está midiendo ya no es la exógena y su valor pasa a ser la tasa de respiración endógena que adquiere en el fango una vez afectado por el agua residual:

OUR endógeno (afectado por el agua residual): $5,4$.

Este descenso supone una señal inequívoca de toxicidad provocada por el agua residual en el fango activo.

Analizando el respirograma observamos además que el efecto tóxico empieza a manifestarse a partir de 40 min. y alcanza su efecto máximo a partir de 1h 50 min. Desde ese momento, el valor de R_s se estabiliza en el nivel de $-5,4$.

En ensayo OUR previo se determinó el OUR de la respiración endógena, con un valor de $16,5$ mg/l.h. Por lo tanto el % de toxicidad se calculará del siguiente modo:

$$\text{Tox} = 100 * (16,5 - 5,4) / 16,4 = 67 \%$$

8.4.4. Conclusiones

1. Queda demostrado que el agua residual provoca una toxicidad aguda en el fango activo y que una vez ejercido su efecto, este fango queda totalmente mermado para desarrollar su función.