

# Simulación de un sistema de fangos activados en discontinuo para la eliminación de materia orgánica y nutrientes\*

José Manga\*\*, Germán Escaf\*\*\*, Nury Logreira\*\*\*\* y Jaime García\*\*\*\*\*

Grupo de Investigación en Tecnologías del Agua, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia)

---

## Resumen

*Se ha desarrollado un simulador para el sistema de fangos activados en discontinuo (Sequencing Batch Reactor o SBR), que permite el estudio de los procesos para la eliminación de la materia orgánica y nutrientes. El simulador incluye el modelo N° 2d de fangos activados (ASM2d) propuesto por la International Water Association (IWA). Además, en fase de sedimentación, se incluye un modelo exponencial o de Vesinlind para la separación de los sólidos en suspensión del licor mezcla. La herramienta informática ha sido utilizada para describir el comportamiento de dos sistemas en discontinuo (anaerobio/aerobio y aerobio/anóxico) bajo diferentes condiciones de operación (tiempo de retención celular, tiempo de retención hidráulico, entre otros). Los resultados muestran que la herramienta informática desarrollada puede ser utilizada para el diseño y simulación de sistemas sbr en el tratamiento de aguas residuales.*

**Palabras clave:** Sequencing Batch Reactor (SBR), modelación matemática, eliminación biológica de nutrientes, sistema de fangos activados, modelo N° 2d de fangos activados (ASM2d).

## Abstract

*A simulator for the activated sludge system (Sequencing Batch Reactor or SBR) has been developed to study the processes of nutrients and organic material removal. The simulator includes the activated sludge model No. 2d (ASM2d) of the International Water Association (IWA). Also, in the sedimentation phase, it has been included an exponential or Vesinlind model for the separation of suspended solids in the mixed liquor. This informatics tool has been used for the study of the behavior of two sequencing batch reactor systems (anaerobic/aerobic and aerobic/anoxic) in different operating conditions (sludge retention time, hydraulic retention time, amongst others). The results obtained show that the developed informatics*

Fecha de recepción: 23 de julio de 2002

---

\* Este artículo forma parte de los resultados de la investigación *Modelación matemática del sistema de fangos activados sequencing batch reactor o reactor en flujo discontinuo SBR*, Universidad del Norte.

\*\* Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Doctorado en Ingeniería de Caminos Canales y Puerto, Universidad Politécnica de Valencia (España). Profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Norte. [jmanga@uinorte.edu.co](mailto:jmanga@uinorte.edu.co)

\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Especialista en Manejo Integrado del Medio Ambiente, Universidad de Los Andes. [gesca2000@yahoo.com](mailto:gesca2000@yahoo.com)

\*\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Especialista en Análisis y Gestión Ambiental de la Universidad del Norte. Magister en Hidrología del Centro de Estudios y Experimentaciones de Madrid. Profesora e investigadora del Departamento de Ingeniería Civil de la universidad del Norte. [nlogreir@uinorte.edu.co](mailto:nlogreir@uinorte.edu.co)

\*\*\*\*\* Ingeniero Civil, Universidad del Norte.

*tool can be used for the design and simulation of sequencing batch reactor systems in waste water treatment.*

**Key words:** Sequencing Batch Reactor (SBR), mathematical modeling, nutrient removal, activated sludge process, activated sludge model N° 2d (ASM2d).

---

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los países desarrollados, uno de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales más utilizado es el sistema de fangos activados. Mayoritariamente, este sistema se viene aplicando en forma continua. Sin embargo, en la actualidad, el sistema de fangos activados en discontinuo (*Sequencing Batch Reactor* o SBR) se presenta como una alternativa adecuada para el tratamiento del agua residual, debido a que ofrece un sinnúmero de beneficios y ventajas con respecto a un sistema de fangos activados convencional (en continuo). Entre las más importantes se tienen: permite tolerar mejor la variabilidad en cargas hidráulicas y orgánicas, flexibilidad en formas de operación, ejerce un mayor control sobre el crecimiento de microorganismos filamentosos, elimina el sedimentador secundario, elimina la bomba de recirculación de fangos, proporciona mayor información acerca de los procesos que tienen lugar en el sistema, lo que facilita un mejor control del mismo, alta estabilidad y fiabilidad del sistema, reduce las necesidades de espacio [1].

El sistema SBR comprende una serie de fases secuenciales, tales como llenado, reacción, sedimentación, purga, vaciado, inactividad, cada una con un período de tiempo definido. Dependiendo del objetivo de calidad que se requiere en el agua efluente, las anteriores fases se combinan de diferentes formas. En este sentido, se puede orientar el sistema para la eliminación de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo).

El diseño de los sistemas de fangos activados en discontinuo para la eliminación biológica de nutrientes es un problema complejo en el que intervienen múltiples factores. Aparte de la consideración de los distintos procesos biológicos que se producen en este tipo de sistemas, llevados a cabo por diferentes tipo de organismos (bacterias heterótrofas no acumuladoras de fósforo, bacterias acumuladoras de fósforo PAO, bacterias autótrofas nitrificantes, entre otras), se deben tener en cuenta: características del agua residual influente, configuración del sistema, condiciones de operación, entre otros.

Hoy día, el diseño de los sistemas de fangos activados se facilita a través del uso de modelos matemáticos que permiten describir el comportamiento metabólico de los organismos responsables de los procesos de degradación de materia orgánica y nutrientes.

Hasta la fecha se han propuesto diferentes modelos que incluyen la eliminación biológica de nutrientes [2, 3, 4]. El más ampliamente aceptado por la comunidad científica es el modelo ASM2 [2], propuesto por la IWA Task Group On Mathematical Modelling For Design And Operation Of Biological Wastewater Treatment Processes. El ASM2 es un modelo mecanicista que describe matemáticamente los procesos de eliminación biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Recientemente se ha reportado una modificación al modelo ASM2, conocida como ASM2d [5], en el que se incluye el proceso de desnitrificación por parte de las bacterias acumuladoras de fósforo. Este último proceso se había descrito en diferentes estudios en la bibliografía [6, 7].

En este trabajo se ha desarrollado un simulador para el proceso de fangos activados en discontinuo que incluye el modelo ASM2d propuesto por la IWA. Además, en fase de sedimentación, se incluye un modelo exponencial o de *Vesinlind* para la separación de los sólidos en suspensión del licor mezcla. Esta herramienta informática ha sido utilizada para describir el comportamiento de dos sistemas de fangos activados en discontinuo para la eliminación de materia orgánica y nutrientes.

### Desarrollo del simulador

En los últimos años se ha incrementado la posibilidad de simular eficientemente el proceso de fangos activados debido al desarrollo, por una parte, de computadores más veloces y, por otra, de modelos matemáticos mucho más aproximados a la realidad.

El desarrollo del simulador de fangos en discontinuo se ha llevado a cabo en el entorno MATLAB/SIMULINK™ [8] (véase figura 1).

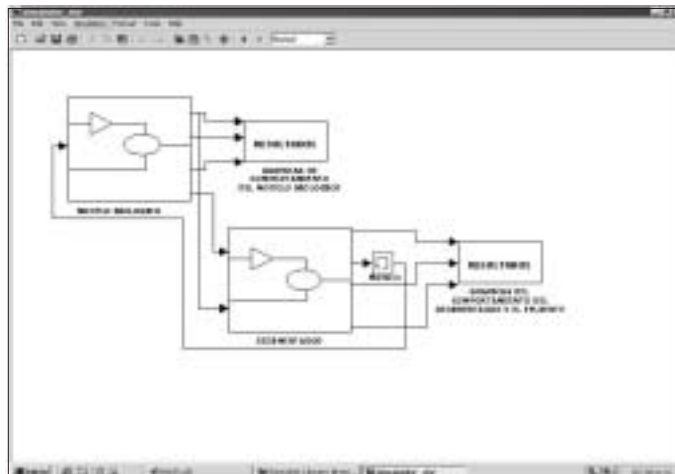


Figura 1. Ventana del simulador

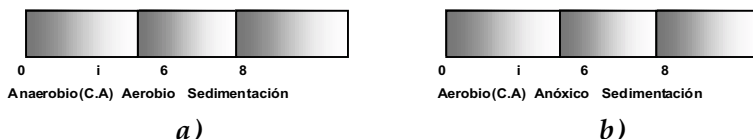
Para la modelación de los procesos biológicos que toman lugar en el sistema, se ha utilizado el modelo ASM2d, el cual permite la eliminación de la materia orgánica y de nutrientes. En este modelo se distinguen dos grupos de componentes: solubles (Si) y suspendidos (Xi). Los componentes suspendidos están asociados al fango activado de tal forma que se pueden concentrar por sedimentación i/o espesamiento en la fase de sedimentación, mientras que los componentes solubles sólo pueden ser transportados en el agua. El modelo ASM2d incluye 9 componentes solubles y 10 suspendidos. Por otra parte, incluye diecisiete procesos biológicos, que son llevados a cabo por los siguientes grupos de microorganismos: heterótrofos, autótrofos y acumuladores de fósforo.

La modelación de la sedimentación de los sólidos en suspensión en el licor mezcla es fundamental para una adecuada descripción del sistema SBR. La mayor parte de los modelos de sedimentación se basan en la teoría de flujo propuesta por Kynch en 1952. Aunque en la literatura se proponen diversos modelos de sedimentación [9, 10, 11], para el desarrollo del simulador se ha considerado un modelo sencillo del tipo exponencial o de *Vesinlind*. En este sentido, la velocidad de sedimentación ( $n_s$ ) de los componentes particulados (X) viene representada por la siguiente expresión:  $v_s = C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot X}$ , donde  $C_1$  y  $C_2$  son parámetros del modelo.

Para la implementación del modelo de sedimentación fue necesario dividir el reactor en 10 capas o estratos horizontales que fueran de mezcla completa. En cada capa se establecieron los balances de materia a cada componente particulado del modelo. Se asumió una geometría del tipo circular para el reactor.

## Simulación

Utilizando la herramienta informática se llevó a cabo la simulación del funcionamiento de dos sistemas de fangos activados en discontinuo. Uno de ellos se orienta a la eliminación de materia orgánica y fósforo (anaerobio/aerobio) y el otro a la eliminación de materia orgánica y nitrógeno (aerobio/anóxico). La duración del ciclo para ambos sistema se estableció en 8 horas (véase figura 2).



**Figura 2.** Esquemas para la eliminación de a) fósforo b) nitrógeno

Para cada uno de los sistemas estudiados se realizaron variaciones tanto en la duración de la fase de reacción aerobia como en el tiempo de retención celular e hidráulico. En total se efectuaron 160 simulaciones con diferentes condiciones de

operación. Se estableció como tiempo de simulación para alcanzar el estado estacionario de un sistema 200 días. La mayor parte de las simulaciones no requirieron un mayor tiempo de simulación. Se utilizó el solucionador ODE45 (basado en el método de cálculo numérico Runge Kuta).

Los parámetros cinéticos y estequiométricos utilizados en las simulaciones son los mismos que se proponen en el ASM2d. Los parámetros del modelo de sedimentación se calibraron a partir de las simulaciones, de tal forma que durante el tiempo de sedimentación establecido (véase figura 2) se permitiera una adecuada sedimentación de los sólidos en suspensión.

### Resultados de las simulaciones y discusión

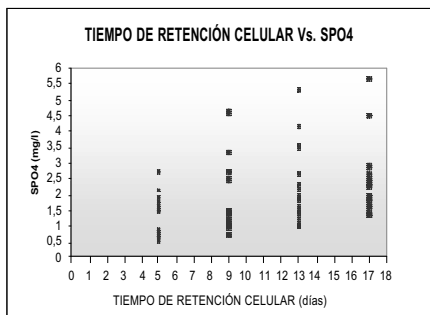
Los resultados obtenidos a través del estudio del funcionamiento de ambos sistemas se presentan a continuación.

#### Remoción biológica de fósforo

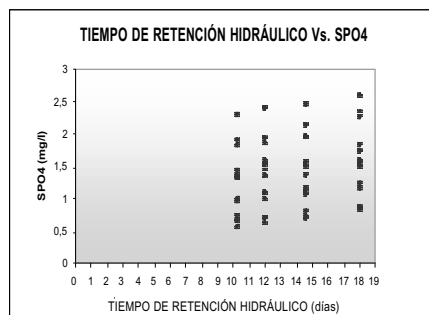
Para el caso de eliminación biológica de fósforo se utilizó, en las simulaciones, el esquema anaerobio-aerobio. Se empleó como agua residual influente al sistema la propuesta en el ASM2d. A esta agua residual se le adicionó suficiente ácido acético ( $S_A$ ) y fósforo ( $S_{PO_4}$ ) con objeto de favorecer el crecimiento de las bacterias PAO.

En todas las simulaciones el agua residual efluente se encontró libre de sólidos en suspensión. Es por esto que fundamentalmente la materia orgánica efluente al sistema de tratamiento viene representada por la suma de la materia orgánica fermentable y los productos de la fermentación ( $S_A + S_F$ ). El fósforo viene representado, en el efluente, por el fósforo soluble ( $S_{PO_4}$ ).

Las siguientes gráficas presentan el efecto que sobre la eliminación de materia orgánica ( $S_A + S_F$ ) y el fósforo ( $S_{PO_4}$ ) tienen el tiempo de retención celular (TRC), la duración de la etapa anaerobia (C.A) y el tiempo de retención hidráulico (TRH).



**Figura 3.** Comportamiento del TRC en la eliminación de  $SPO_4$



**Figura 4.** Comportamiento del TRH en la eliminación de  $SPO_4$

En la figura 3 se observa cómo la eliminación de fósforo se desmejora a mayores tiempos de retención celular. Esto sugiere que bajos tiempos de retención son benéficos para la eliminación de fósforo. En la figura 4 se muestra que el tiempo de retención hidráulico no afecta considerablemente la eficiencia del sistema en relación con la eliminación de fósforo. El leve comportamiento ascendente que se muestra en la figura 4 se asocia al aumento de la duración de la etapa anaerobia en un ciclo (especialmente para los casos de duración de la etapa anaerobia de 4 horas, véase figura 5). En la figura 5 se muestra que, para el caso simulado, la remoción de fósforo aumenta hasta una duración de la etapa anaerobia de 3 horas. A partir de ese valor, la eficiencia en la remoción de fósforo disminuye. Este hecho se asocia a la disminución en el sistema de microorganismos PAO. Esto implica que para un caso dado se debe optimizar la duración de la fase anaerobia con el fin de obtener una adecuada remoción de fósforo.

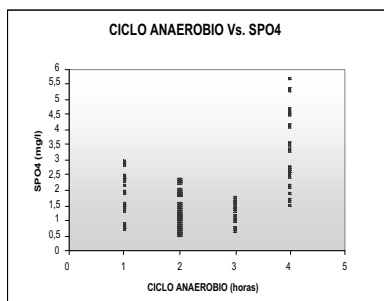


Figura 5. Comportamiento del C.A en la eliminación de  $SPO_4$

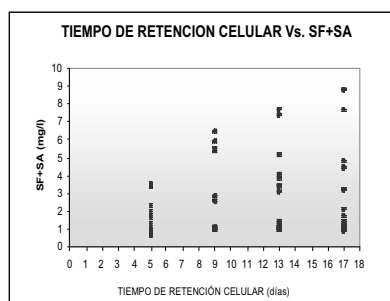


Figura 6. Comportamiento del TRC en la eliminación de  $S_F+S_A$

Con respecto a la eliminación de la materia orgánica, se puede observar que ésta se ve afectada a mayores tiempos de retención celular (véase figura 6). En la figura 7 se muestra que hasta con valores de duración de la etapa anaerobia de 3 horas se consiguen adecuadas eliminaciones. A partir de este valor se disminuye la eficiencia del sistema. Este hecho se asocia a la disminución de organismos heterótrofos responsables de la eliminación de materia orgánica.

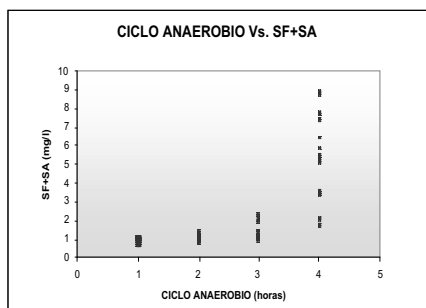


Figura 7. Comportamiento del C.A en la eliminación de  $S_F+S_A$

No se encontró un efecto importante del tiempo de retención hidráulico sobre la eliminación de materia orgánica. Esto se explica por el hecho de que fundamentalmente el tiempo de retención hidráulico modifica la concentración de microorganismos en el sistema, y no altera (significativamente) la masa total de microorganismos en el mismo.

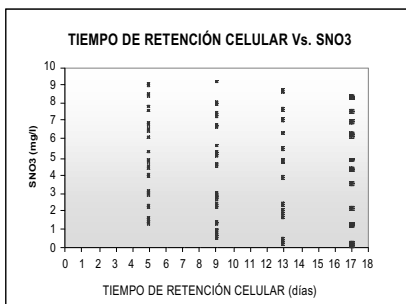
### Remoción biológica de nitrógeno

Para el caso de eliminación biológica de nitrógeno se utilizó, en las simulaciones, el esquema aerobio-anóxico. Se utilizó como agua residual influente al sistema la propuesta en el ASM2d.

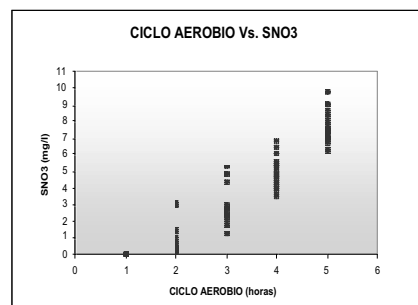
En todas las simulaciones el agua residual efluente se encontró libre de sólidos en suspensión. Es por esto que fundamentalmente la materia orgánica efluente al sistema de tratamiento viene representada por la materia orgánica fermentable ( $S_F$ ). El nitrógeno viene representado, en el efluente, por el amonio ( $S_{NH_4}$ ) y el nitrato ( $S_{NO_3}$ ).

Las siguientes gráficas presentan el efecto que sobre la eliminación de materia orgánica ( $S_F$ ) y el nitrógeno ( $S_{NH_4}$  y  $S_{NO_3}$ ) tienen el tiempo de retención celular (TRC), la duración de la etapa aerobia (C.A) y el tiempo de retención hidráulico (TRH).

En la figura 8 se observa que la eliminación de  $S_{NO_3}$  se ve favorecida a mayores tiempos de retención celular. Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos se obtuvo una nitrificación completa del amonio (véase figura 10), se puede decir que la remoción de nitrógeno se ve favorecida a elevados tiempos de retención celular. En el caso estudiado, para valores de tiempo de duración de la fase aerobia de 1 hora se observó que los microorganismos nitrificantes no se establecieron en el sistema (véase figuras 9 y 10). A medida que aumenta la duración de la fase aerobia se aumenta la producción de nitrato, dado el aumento de la biomasa nitrificante en el sistema.



**Figura 8.** Comportamiento del TRC en la eliminación de  $S_{NO_3}$



**Figura 9.** Comportamiento del C.A en la eliminación de  $S_{NO_3}$

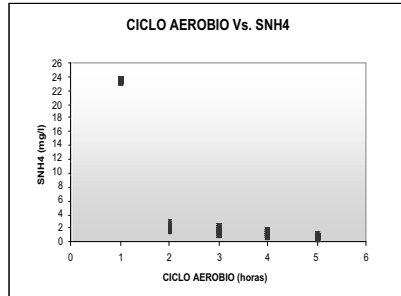


Figura 10. Comportamiento del C.A en la eliminación de  $S_{NH4}$

Al igual que en el caso de eliminación biológica de fósforo, no se presentó un importante efecto del tiempo de retención hidráulico sobre la eliminación de nitrógeno.

La figura 11 muestra el efecto que presenta el TRC sobre la eliminación de la materia orgánica en el sistema. Como se puede observar, en todos los casos simulados se obtuvo una adecuada eliminación de materia orgánica (menor que 0.5 mg DQO/L). La remoción de materia orgánica no se afectó ni por la duración de la etapa aerobia ni por el tiempo de retención hidráulico.

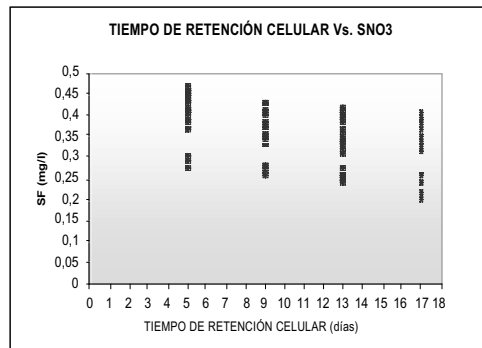


Figura 11. Comportamiento del TRC en la eliminación de  $S_F$

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta informática que permite la simulación matemática de los procesos de degradación de materia orgánica y nutrientes en sistemas de fangos activados en discontinuo (SBR). Esta herramienta ha permitido estudiar el funcionamiento del sistema SBR para la eliminación de materia orgánica y nutrientes bajo diferentes condiciones de operación. Para los casos estudiados, el parámetro de mayor influencia en la remoción de nutrientes es el tiempo de



retención celular (TRC). Se muestra que TRC bajos favorecen el proceso de eliminación de fósforo y TRC altos favorecen la eliminación de nitrógeno. Por tanto, en procesos de eliminación conjunta se hace necesario la optimización de este parámetro para la eliminación de ambos nutrientes. Estos resultados concuerdan con diversos estudios encontrados en la literatura [12]. Por otra parte, los resultados de las simulaciones muestran que la herramienta desarrollada permite un adecuado estudio del proceso de fangos activados en discontinuo. Además, se muestra que la herramienta puede ser utilizada para el diseño y simulación de sistemas SBR en el tratamiento de aguas residuales.

## Referencias

- WILDERER, P.A., IRVINE, R.L. & GORONSKY, M. (2001). Sequencing Batch Reactor Technology. *Scientific and Technical Report N° 10*. International Water Association Publishing.
- HENZE, M., GUJER, W., MINO, T., MATSUO, T., WENTZEL, M. & MARAIS, G.V.R. (1995). Activated Sludge Model N° 2. *IAWQ Scientific and technical report*. IAWQ, London.
- BARKER, P.S. & DOLD, P.L. (1997). General model for biological nutrient removal activated-sludge system: model presentation. *Water Environment Research*, 69 (5), 969-984.
- MAURER, M. & GUJER, W. (1998). Dynamic Modeling of enhanced biological phosphorus and nitrogen removal in activated sludge systems. *Water Quality International* (1998). Vancouver, Canadá, 192-199.
- HENZE, M., GUJER, W., MINO, T., MATSUO, T., WENTZEL, M., MARAIS, G. & VAN LOOSDRECHT, M.C.M. (1999). Activated Sludge Model N° 2D, ASM2d. *Water Science and Technology*, 39(1), 165-182.
- KUBA, T., MURNLEITNER, E., VAN LOOSDRECHT, M. C. M. & HEIJNEN, J.J. (1996). A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 52 (6), 685-695.
- BARKER, P.S. & DOLD, P.L. (1996). Denitrification behaviour in biological excess phosphorus removal activated sludge system. *Water Research*, 30 (4), 769-780.
- MATLAB (1999). MATLAB/SIMULINK User Guide, the Mathworks, 1999.
- TAKÁCS, Y., PATRY, G.G. & NOLASCO, D. (1991). A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water science and Technology*, 25(10), 1263-1271.
- OTTERPOHL, R. & FREUND, M. (1992). Dinamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows. *Water science and Technology*, 26(5-6), 1391-1400.
- DUPOND, R. & HENZE, M. (1992). Modelling of the secondary clarifier combined with the activated sludge model N° 1. *Water Science and Technology*, 25(6), 285-300.
- RODRIGO, M.A., SECO, A., PENYA-ROJA, J.M. & FERRER, J. (1996). Influence of sludge age on enhanced phosphorus removal in biological systems. *Water Science and Technology*, 34 (1 / 2), 41-48.