

ANÁLISIS DE LA SEDIMENTABILIDAD DE LOS LODOS BIOLÓGICOS PRODUCIDOS EN UN RCS DURANTE LA DESNITRIFICACIÓN DE UN EFLUENTE DE UN BIORREACTOR DE CRECIMIENTO ADHERIDO

GRISELDA FERRARA-GINER¹, ARMANDO RAMÍREZ²

¹Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Dpto. Ingeniería sanitaria y Ambiental. E-mail: griferrara1941@gmail.com.

² Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias de la Tierra. E-mail: armando.ramirez@ciens.ucv.ve.

Recibido: marzo 2012

Recibido en forma final revisado: mayo 2013

RESUMEN

Se ensayó el comportamiento de sedimentación de los lodos del licor mezclado de un reactor por carga secuencial (RCS) a escala de laboratorio (10 litros) operando bajo condiciones anóxicas para desnitrificar un sustrato constituido por el efluente de un biorreactor de crecimiento adherido alimentado con un líquido residual sintético. El reactor fue operado en ciclos de seis (6) horas y bajo tres condiciones de fracción volumétrica (50%, 20% y 0%) de líquido residual sintético usadas para complementar el contenido de carbono orgánico en el RCS. La secuencia operacional consistió de las siguientes fases: llenado, 15 minutos; reacción anóxica, 4 h y 30 min; “pulido” (aireación/agitación), 15 min; sedimentación, 45 min; descarga, 15 min. Se hicieron cuatro (4) experiencias de sedimentación para cada fracción suplementaria usada y se midieron los parámetros convencionales utilizados para evaluar la sedimentabilidad de los lodos: Índice Volumétrico de Lodos (IVL), velocidad de sedimentación de la interfase (r_s) y tiempo crítico (t_c). La conducta de sedimentación obtenida fue excelente cuando la fuente suplementaria de carbono añadida era 20% y bastante buena para 50 y 0%. Las tasas de sedimentación alcanzaron valores considerados altos y los tiempos críticos de sedimentación estuvieron en el mismo orden de experiencias previas.

Palabras clave: Biorreactores, Desnitrificación, Sedimentación de lodos biológicos, Reactores por carga secuencial, Tratamiento de aguas residuales.

SETTLABILITY ANALYSIS OF BIOLOGICAL SLUDGES PRODUCED IN SBR DURING EFFLUENT BIOLOGICAL REACTOR DENITRIFICATION

ABSTRACT

The sedimentation behavior of mixed liquor sludge of a sequential batch reactor (SBR), operated to laboratory scale (10 liters capacity) under anoxic conditions in order to denitrify a substrate integrated by the effluent of a attached growth bioreactor feeded with a synthetic residual liquid. The denitrifying process was operated by 6 hours cycles and under three different conditions of volumetric fraction (50%, 20% y 0%) required to balance the organic carbon content. The operational sequence consisted of the following phases: filled, 15 min; anoxic reaction, 4 hours and 30 min; “polished” (aeration/agitation), 15 min; sedimentation, 45 min; decant, 15 min. Four experiments were done for each supplementary carbon fraction and the sedimentation rate was measured in a 1 liter graduated cylinder. This permitted to evaluate the sludge sedimentation behaviour: the sludge volumetric index (IVL), sedimentation rate at the interphase (r_s) and the critical time (t_c). The sludge characteristics obtained indicate that the IVL values showed an excellent sedimentation behaviour when the volumetric fraction used was 20% and very good for 50% and 0%. The sedimentation rate reached relatively high values and the critical time values were similar to other previous experiments.

Keywords: Biological reactors, Denitrification, Sludge behaviour, Sequential batch reactors, Wastewater treatment.

INTRODUCCIÓN

La sedimentación por gravedad es una de las operaciones unitarias más utilizadas para remover el material suspendido producido en cualquiera de las variantes del sistema de tratamiento biológico conocido como lodos activados. La generación de una gran masa de microorganismos al convertirse la materia orgánica en energía y nuevo material celular, es un hecho esencial del proceso. El desarrollo de una biomasa floculenta y compacta que sedimente rápidamente, permitiendo la producción de un efluente clarificado, es esencial para el éxito del tratamiento. La forma más económica de alcanzar esta separación es remover los sólidos suspendidos por sedimentación (Grady *et al.* 1999; Crites & Tchobanoglous, 2000; Metcalf & Eddy, 2003; Rojas, 2004; Dominiak, 2010).

Un reactor por carga secuencial (RCS), al igual que las otras variantes de los lodos activados, requiere obtener un efluente bien clarificado, estable, con bajo contenido de materia orgánica y sólidos suspendidos, de manera de poder cumplir con las reglamentaciones sobre efluentes existentes en cada país, en particular el Decreto 883 en el caso de Venezuela (MARNR, 1995). Por ello, después de la fase de reacción, incluida en el ciclo de trabajo del RCS, es necesario someter al licor mezclado presente en el tanque, a la fase de sedimentación. El propósito de esta fase es permitir la separación de los sólidos biológicos formados durante el período de transformación del sustrato (Wilderer *et al.* 2001; Dominiak, 2010).

En este trabajo se utilizó un RCS para desnitrificar el efluente nitrificado de un biorreactor de crecimiento adherido con el cual estaba acoplado y que fue alimentado con líquido residual sintético que simulaba un residual doméstico. El RCS operó bajo condiciones anóxicas, ambiente apropiado para llevar a cabo la desnitrificación, etapa final de la remoción biológica de nitrógeno.

Los RCS son una variante discontinua del proceso de lodos activados convencional de flujo continuo, tan utilizado a nivel mundial. A diferencia de éste, la compensación de flujo, el tratamiento y la sedimentación se logran en un mismo reactor por el modo de operación por carga, eliminándose la necesidad de reactores y clarificadores separados. La flexibilidad de operación del RCS permite que todas las fases del ciclo de trabajo (llenado, reacción, sedimentación y descarga) puedan regularse para producir el efluente deseado. Las condiciones aeróbicas, anaeróbicas o anóxicas durante la reacción pueden alcanzarse según la estrategia seleccionada para la aireación. Al igual que con cualquier sistema de tratamiento la exigencia de un efluente

clarificado debe cumplirse y se logra sometiendo al licor mezclado a la fase de sedimentación luego de cumplirse la fase de reacción (Wilderer *et al.* 1997; Wilderer *et al.* 2001; Wett *et al.* 2011).

Entre los diversos métodos para resolver el problema de la remoción de nitrógeno presente bajo la forma de nitrato en efluentes de tratamiento biológico, la alternativa de la eliminación biológica de nitrógeno es ampliamente usada por la comunidad científica por tener costos generalmente inferiores a los procesos físicos y químicos, al disminuir la necesidad de oxígeno y por ende de energía. Esta vía se lleva a cabo en dos pasos: la nitrificación y la desnitrificación. El primero cuenta con el concurso de bacterias quimioautotróficas que transforman el nitrógeno amoniacal en nitritos y sucesivamente en nitratos, en un ambiente aerobio y posteriormente estos pueden ser reducidos a formas de nitrógeno gaseoso, en un ambiente anóxico, con la participación de bacterias heterotróficas (Sawyer *et al.* 2001; Rittman & McCarty, 2001).

En este trabajo se enfoca la desnitrificación que ocurre acoplada a la cadena de transporte de electrones respiratoria, donde los nitritos y nitratos son usados como aceptores de electrones para la oxidación de una variedad de donantes de electrones orgánicos (Gaudy & Gaudy, 1980). Como se trata de un mecanismo respiratorio se necesita de un sustrato oxidable que proporcione energía. Ese papel lo cumple la materia orgánica carbonosa presente en el líquido residual. Generalmente los sistemas de tratamiento, tal como en el caso que nos ocupa, llevan a cabo en primer lugar la remoción de materia carbonosa y nitrificación, produciendo efluentes con bajo contenido de donantes de electrones y en la subsiguiente etapa desnitrificante frecuentemente debe añadirse una fuente de carbono exógena que permita la reducción del nitrato incrementando al mismo tiempo la tasa de desnitrificación. A nivel mundial se ha usado ampliamente metanol y acetatos, que incrementa los costos del proceso, pero una alternativa más económica es usar una fracción volumétrica de líquido residual crudo. (Rittman & McCarty, 2001; Barajas, 2002).

La fase de sedimentación de un RCS, al igual que con cualquiera de las variantes del proceso de lodos activados, es de singular importancia si se quiere alcanzar una clarificación exitosa. Para ello, las características de sedimentación y compactación de los sólidos biológicos producidos durante la fase de la reacción y referidos como los sólidos suspendidos del licor mezclado (SSLM), con concentraciones que están entre 3.000 y 5.000 mg/l, deben inducir la mejor capacidad de separación sólido/líquido (Dominiak, 2010). El conocimiento de este comportamiento

y las variables que lo afectan son importantes para el diseño de estos reactores biológicos.

El objetivo de este trabajo, es evaluar la conducta de sedimentación del lodo producido en un RCS al desnitrificar un sustrato previamente nitrificado proveniente de un biorreactor de crecimiento adherido que fue alimentado con un líquido residual sintético.

CONDUCTA DE SEDIMENTACIÓN DE LOS LODOS

En el ciclo de operación del RCS, la fase de reacción incluye además de la desnitrificación el desarrollo de una biomasa floculenta, compacta y robusta que pueda sedimentar rápidamente produciendo un lodo denso para un reciclaje óptimo y un sobrenadante claro de alta calidad para su descarga como efluente tratado. Para evaluar la conducta de sedimentación de los lodos biológicos producidos en el RCS, los parámetros convencionales utilizados son el Índice Volumétrico de Lodos (IVL), la velocidad de sedimentación de la interfase (v_s) y el tiempo crítico (t_c) (Rössle *et al.* 2009; Dominiak, 2010).

El IVL fue desarrollado por Mohlman, como cita Rössle *et al.* (2009), y se basa en las propiedades físicas de los Sólidos Suspendedos del Licor Mezclado (SSLM). El IVL cuantifica el volumen de estos lodos expresado en unidades de ml/g. Se mide como la altura, expresada en “ml” de la interfase de los sólidos después de sedimentar el licor mezclado del biorreactor durante 30 minutos, en un cilindro graduado de 1.000 ml, dividido por la masa de sólidos expresada en gramos. Esta masa es el conocido parámetro SSLM característico de los reactores de cualquiera de las variantes de lodos activados. El resultado representa el volumen ocupado por un gramo de sólidos suspendidos en el licor mezclado, conocido como el Índice Volumétrico de los Lodos. El ensayo, estandarizado para mayor reproducibilidad, ha sido usado muy frecuentemente para describir la conducta de sedimentación del lodo (Crites & Tchobanoglous, 2000; Metcal & Eddy, 2003). No obstante, la aplicabilidad general de esta medición ha sido cuestionada debido a la dependencia con la concentración de sólidos y el diámetro del cilindro usado en el ensayo. Sin embargo, a pesar de sus deficiencias, el IVL es la medida de compactibilidad de los lodos más ampliamente utilizada por los investigadores del área (Silverstein & Schroeder, 1983; Rittmann & McCarty, 2001; Metcalf & Eddy, 2003; Rössle *et al.* 2009; Wett *et al.* 2011). Los lodos floculados con un IVL de 150 ml/g frecuentemente son considerados como la línea divisoria entre un lodo voluminoso (valores por encima) y no voluminoso. Grady *et al.* (1999) consideran que valores por debajo de 80 ml/g son excelentes y entre 80 y 150 ml/g

son moderados. Rössle *et al.* (2009) consideran que un IVL entre 100 y 150 ml/g indica una buena sedimentación y que valores superiores, generalmente, pero no siempre, están asociados con el fenómeno del levantamiento de los lodos (“bulking”) indicando una pobre sedimentación y una baja velocidad de sedimentación. Pophali *et al.* 2009 indican que valores de IVL entre 76 y 80 ml/g pueden considerarse indicadores de una buena sedimentabilidad.

Para alcanzar una buena sedimentación y compactación de la biomasa floculenta que constituye la mayor parte de los sólidos suspendidos en el licor mezclado es necesario contar con un balance apropiado entre las bacterias formadoras de floculos y las filamentosas. En tal caso se obtiene un lodo compacto y fuerte que sedimentará rápidamente (Grady *et al.* 1999). A continuación se presenta la Tabla 1, elaborada por Grady *et al.* (1999), que resume las relaciones típicas entre IVL y las características de sedimentación de los lodos activos.

Tabla 1. Relaciones entre el IVL y las características de sedimentación de los lodos activos

Rango de IVL ml/g	Características de compactación y de sedimentación de los lodos activos
< 80	Excelente
80-150	Moderado
>150	Pobre

Fuente: Grady *et al.* 1999

La tasa de sedimentación de la interfase, medida durante la ejecución del ensayo del IVL, es otro parámetro usado para explicar una sedimentación exitosa (Pophali *et al.* 2009). Se obtiene midiendo la altura de la interfase de los lodos a diferentes intervalos de tiempo durante la ejecución del ensayo del IVL (Metcalf & Eddy, 2003). La velocidad de la interfase se expresa en unidades de “(ml/L)/ min”, por cuanto las medidas son realizadas en mililitros (ml) en intervalos de 1 minuto durante el ensayo del IVL y son obtenidas al leer los mililitros ocupados por el lodo sedimentado (indicado por la interfase) en un cilindro cuyo volumen es un (1) litro. La velocidad de descenso de la interfase corresponde a la pendiente de la curva en cada instante. La velocidad de sedimentación se determina a partir de la pendiente en la zona denominada de sedimentación floculenta, ignorando los puntos iniciales y los de las zonas de transición y compresión. Esta misma curva permite obtener el tiempo crítico (t_c) de la sedimentación que mide el tiempo mínimo en alcanzar dicha tasa, mediante el método de Talmadge y Fitch (Crites & Tchobanoglous, 2000; Metcalf &

Eddy, 2003). Este método consiste en prolongar, hasta su intersección, las tangentes a las regiones de compresión y sedimentación flocculenta de la curva de descenso de la interfase y trazando a continuación la bisectriz del ángulo formado por ambas rectas; donde se corte ésta con la curva se obtiene el parámetro tiempo crítico.

METODOLOGÍA EMPLEADA Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En este estudio se utilizó un modelo de RCS de 10 litros de capacidad, disponible en el Laboratorio de Procesos Unitarios del Departamento de Ingeniería Sanitaria de la FI-UCV. La secuencia de operación del reactor sigue las fases típicas de operación de los RCS, utilizando los siguientes tiempos: llenado, 15 minutos; reacción anóxica, 4 h y 30 min; “pulido” (aireación/agitación), 15 min; sedimentación, 45 min; descarga, 15 min. Como cada ciclo de operación es de 6 horas se consiguen 4 ciclos/día. A pesar de que la operación del biorreactor se llevó a cabo en ambiente anóxico, se incluyó un breve período de 15 minutos de aireación/agitación, denominado de pulido con miras a eliminar los subproductos gaseosos de la desnitrificación. El reactor por carga secuencial fue alimentado con el efluente de un reactor de crecimiento adherido y en el cual se removía materia carbonosa y se nitrificaba un líquido residual sintético de composición débil que simula a las aguas residuales domésticas del país. Para garantizar el carbono orgánico requerido por las bacterias heterotróficas que realizaban la desnitrificación, y el cual estaba disminuido en el efluente del reactor de crecimiento adherido, se hicieron experiencias complementando la alimentación del RCS con una fuente suplementaria de carbono constituida por una fracción de líquido residual sintético crudo.

El sistema operó con una relación C/N aproximadamente igual a 7,07 expresado en mg DQO/mg N. Se ensayaron tres valores de la fuente suplementaria de carbono, utilizando como porcentaje de agua residual cruda enviada al RCS: 50%, 20% y 0%. Se determinaron los parámetros típicamente relacionados con la conducta de sedimentación de los lodos, objetivo de esta publicación, y consistentes en: el Índice Volumétrico de Lodos (IVL), la tasa de sedimentación de los lodos (r_s) y el tiempo crítico (t_c). Para su determinación se utilizaron las técnicas explicadas con detalle en la sección anterior sobre la conducta de sedimentación de los lodos. Adicionalmente fueron determinados los parámetros físicos: sólidos suspendidos totales (SST) y turbiedad, tanto en el afluente como el efluente del sistema estudiado, por ser parámetros asociados con el desempeño de la sedimentación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 1, 2 y 3 que se muestran a continuación presentan las curvas de sedimentabilidad del licor mezclado obtenidas para cada una de las tres fracciones suplementarias de carbono ensayadas. Se hace la observación que se hicieron cuatro (4) series de ensayos con las fracciones de 50% y 0% de carbono adicional y cinco (5) series con la fracción de 20% y las mismas permitieron calcular valores promedio de los parámetros característicos del proceso de sedimentación.

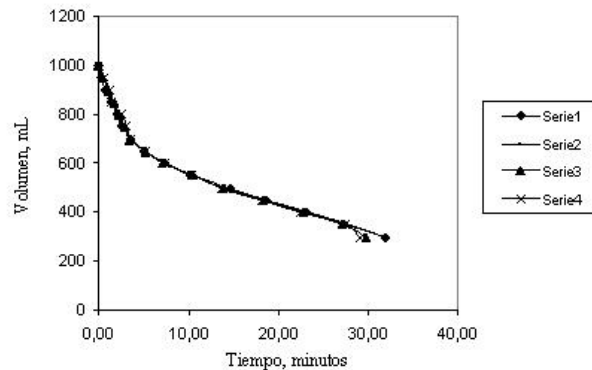


Figura 1: Perfiles de la interfase del ensayo de sedimentabilidad. Caso 50 % fracción suplementaria de carbono

Figura 1. Perfiles de la interfase del ensayo de sedimentabilidad. Caso 50% fracción suplementaria de carbono

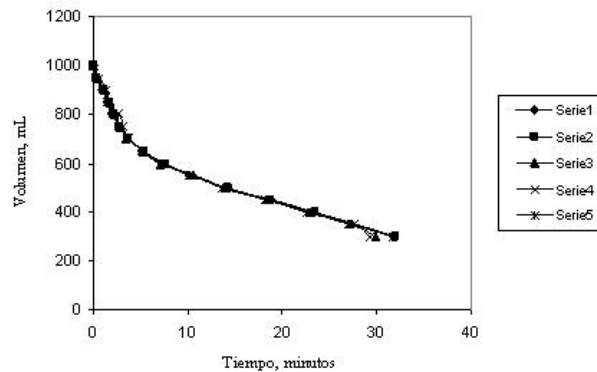


Figura 2: Perfiles de la interfase del ensayo de sedimentabilidad. Caso 20 % fracción suplementaria de carbono

Figura 2. Perfiles de la interfase del ensayo de sedimentabilidad. Caso 20 % fracción suplementaria de carbono

La forma de las curvas es representativa de los ensayos característicos que permiten evaluar la conducta de sedimentación de los sólidos del licor mezclado y presentan claramente definidas las zonas de floculación y compresión de las partículas durante la sedimentación tipo III. Los valores de la altura de la interfase, para diferentes intervalos de tiempo, en la zona lineal inicial de la curva -zona de sedimentación floculenta- permitieron calcular las tasas de sedimentabilidad en unidades de ml/L.min (r_s). Como aconseja la literatura, se ignoraron los primeros puntos. Los tiempos críticos de sedimentación fueron obtenidos utilizando el método de Talmadge y Fitch anteriormente mencionado. La altura de la interfase al cabo de 30 minutos de sedimentación del licor mezclado combinado con los SSLM permite calcular el IVL.

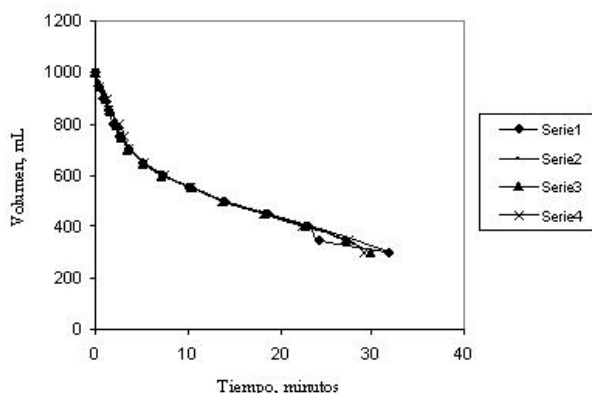


Figura 3: Perfiles de la interfase del ensayo de sedimentabilidad. Caso 0 % fracción suplementaria de carbono

Figura 3. Perfiles de la interfase del ensayo de sedimentabilidad. Caso 0 % fracción suplementaria de carbono

La Tabla 2 presenta los valores de los SSLM obtenidos en el RCS al realizarse cada uno de los ensayos de sedimentabilidad. Con los datos obtenidos a partir de la realización de al menos cuatro (4) series, para cada situación ensayada, se obtuvieron los valores promedio de los parámetros, ya mencionados, usados para evaluar la sedimentación.

Tabla 2. Valores de los sólidos suspendidos del licor mezclado en el RCS

FSC (%)	SSLM (mg/L)				
	Serie ensayada				
	1	2	3	4	5
50	3.019	3.294	3.067	3.067	-
20	2.711	2.824	2.740	2.786	2.366
0	2.801	2.694	2.702	2.732	-

FSC: Fracción suplementaria de carbono

A continuación, en la Tabla 3, se presentan los resultados promedio de los parámetros utilizados convencionalmente para estudiar la sedimentación de los lodos biológicos producidos en el RCS (Metcalf & Eddy, 2003; Rössle *et al.* 2009; Wett *et al.* 2011). Aparecen los valores obtenidos para las tres situaciones experimentadas (50%, 20% y 0% de fuente suplementaria de carbono, respectivamente).

Los valores promedio del IVL obtenidos para cada uno de los porcentajes de sustrato sintético ensayados se pueden considerar indicativos de una excelente conducta de sedimentación y compactación para el caso con 20% de fuente suplementaria de carbono y muy buena para los otros 2 casos, como puede expresarse con base a la clasificación citada por Grady *et al.* (1999) y Barajas (2002) y a los resultados mostrados por Rössle *et al.* 2009. Adicionalmente puede citarse el estudio de Abufayed & Schroeder (1986) trabajando con un RCS y usando lodo primario como fuente de carbono obtuvieron valores de IVL entre 25 y 75 ml/g que expresan excelentes condiciones de separación sólido/líquido. Así mismo, Wett *et al.* (2011) trabajando con un RCS consiguieron una reducción del IVL de 170 a 110 ml/g considerando esta disminución del parámetro una clara demostración del exitoso desempeño del reactor.

Las tasas de sedimentación alcanzaron valores que pueden considerarse altos, con promedios de 106, 293 y 80 (ml/L)/min, respectivamente. Un valor alto indica que los lodos sedimentarán en un tiempo corto, cuestión altamente apreciable porque así el requerimiento de tiempo para este período de la secuencia de trabajo será menor y esto se refleja en los tiempos críticos alcanzados para cada una de las fuentes suplementarias de carbono utilizadas cuyos valores promedio fueron 8,7, 3 y 5,5 minutos, respectivamente; valores que se encuentran en el mismo rango de experiencias similares realizadas por otros investigadores (Jones *et al.* 1990; Portillo, 1994; Espinoza, 1996; Pophali *et al.* 2009) quienes han reportado como aceptables valores semejantes obtenidos en ensayos de sedimentación.

Silverstein & Schroeder (1983) trabajando con 3 ciclos/día en un RCS alimentado con melaza, como fuente de carbono, y variando las condiciones de llenado (lento o rápido, aireado o anóxico), consiguieron valores de tasas de sedimentación entre 9,6 y 16,6 ml/L.min, mucho más bajos que los aquí obtenidos. Por otra parte, Espinoza (1996), quien experimentó con tres (3) RCS y utilizó en la etapa de nitrificación tiempos de aireación de 0, 15 y 30 minutos, alcanzó en el ciclo de desnitrificación valores entre 9 y 76 ml/L.min, independientemente de trabajar con carga débil o sobrecarga. Así mismo, en el ciclo de desnitrificación

Tabla 3. Características de sedimentación de los lodos en el RCS

FSC (%)	IVL (ml/g)		r_s (ml/L.min)		t_c (min)	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango
50	94	88-103	106	96-121	8,7	8-9,2
20	63	47-72	293	245-360	3	2,4-4,2
0	117	114-123	80	64-88	5,5	5-5,8

FSC: Fracción suplementaria de carbono

del trabajo de Portillo (1994) operando tres (3) RCS con carga débil, pero diferentes tiempos de aireación (0, 15 y 30 minutos) en la etapa de nitrificación, consiguió valores de tasas de sedimentación de los lodos del licor mezclado de 13, 112 y 8 ml/L.min, respectivamente. Puede observarse que las velocidades de sedimentación obtenidas para variadas condiciones de operación, están comprendidas en una amplia gama, pero las obtenidas en este trabajo, en cualquier caso están por encima.

En el trabajo realizado por Bilanovic *et al.* (1999), quienes estudiaron la desnitrificación de un sustrato con alta concentración de nitrato y usaron un RCS operado en condiciones anóxicas y un RCS operado en condiciones oxi-anóxicos alternantes, como es el caso en este trabajo, concluyeron en relación a las características de sedimentación de los lodos, que el ambiente oxi-anóxico alternante favorecía la formación de flóculos con valores de IVL por debajo de 90 ml/g indicativo de muy buenas características de sedimentación. Esto confirma que el uso de un período de 15 minutos de aireación después de la reacción anóxica es positivo no sólo para eliminar los subproductos gaseosos de la desnitrificación, para lo cual fue establecido originalmente, sino para beneficio de la sedimentación y compactación.

Parámetros asociados con el desempeño de la sedimentación como es el caso de los SST y la turbiedad alcanzan valores muy bajos en el efluente del RCS, corroborando la información suministrada por el IVL y puede observarse en la Tabla 4. Los valores promedio presentados por los SST en el efluente cumplen con creces la normativa referida a los vertidos en cuerpos de agua del país (Decreto 883, MARNR, 1995). Aunque la turbiedad no aparece en los parámetros normados para vertidos puede apreciarse que los valores obtenidos son bajos y es señal de una buena clarificación.

Tabla 4. Valores promedio de los sólidos suspendidos totales (SST) y de las turbiedades en el afluente y efluente del RCS

FSC (%)	Afluente		Efluente	
	SST mg/L	Turbiedad UNT	SST mg/L	Turbiedad UNT
50	15 ± 3	17 ± 2,1	12 ± 3	12 ± 1,9
20	19 ± 2	4,6 ± 2,2	14 ± 2	3,8 ± 2,2
0	20 ± 2	6,0 ± 1,8	16 ± 2	5,9 ± 1,8

FSC: Fracción suplementaria de carbono

CONCLUSIONES

- Las características de los lodos producidos en el RCS y medidas con el IVL indican una conducta de sedimentación excelente cuando la fuente suplementaria de carbono añadida era 20% y buena para 50 y 0%.
- Las tasas de sedimentación alcanzaron valores considerados altos y los tiempos críticos de sedimentación estuvieron en el mismo orden de experiencias previas.
- Los valores de tiempo crítico obtenidos están en el mismo rango de experiencias similares realizadas por otros investigadores.
- Puede considerarse que los RCS operados en condiciones anóxicas-para promover la desnitrificación- producen lodos con características de sedimentación y compactación excelentes.

REFERENCIAS

- ABUFAYED, A. & SCHROEDER, E. (1986). Performance of SBR/ denitrification with a primary sludge carbon source. JWPCF, Vol. 58, N° 5, pp. 398-405.
- BARAJAS, M.G. (2002). Eliminación biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

- BILANOVIC, D., BATTISTONI, F., CECCHI, P., PAVAN, P., MATA-ALVÁREZ, J. (1999). Denitrification under high nitrate concentration and alternating anoxic conditions. *Wat. Res.* 33, (15), 3311-3320.
- CRITES, R. & TCHOBANOGLIOUS, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Ed. McGrawHill Interamericana SA. Bogotá.
- DOMINIÁK, D. (2010). Drainage properties of activated sludge. PhD Dissertation. Department of Biotechnology, Chemical and Environmental Engineering, Universidad Aalborg. Dinamarca.
- ESPINOZA, A. (1996). Algunos factores que afectan la desnitrificación biológica en un reactor por carga secuencial. TEG. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. UCV.
- GAUDY, A. & GAUDY, E. (1980). *Microbiology for Environmental Scientist and Engineers*. McGraw Hill, Inc.
- GRADY, L. DAIGGER, G., LIM, H. (1999). *Biological Wastewater Treatment*. 2º Ed. Marcel Dekker, Inc. New York, 1075 pp.
- JONES, W., WILDERER, P., SCHROEDER, E. (1990) Operation of three-stage SBR System for nitrogen removal from wastewater. *Research Journal WPCF*, 62 (3), 268-274.
- MARNR (1995). Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos.
- METCALF & EDDY (EDIT.) (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw Hill. New York, 1819 pp.
- POPHALI, G.R., KAUL, S.N., NANDY, T., DEVOTTA, S. (2009) Development of a novel circular secondary clarifier for improving solids liquid separation in wastewater treatment. *Water Env. Research*, Vol. 81, Nº 2, 140-149.
- PORTILLO, M. (1994). Efecto del tiempo de aireación sobre la desnitrificación biológica en reactores por carga secuenciales. TEG. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. UCV.
- RITTMAN, B. E. & MCCARTY, P. (2001). *Biología del Medio Ambiente*. MacGraw Hill/Interamericana de España, Madrid, 744 pp.
- ROJAS, J. A. (2004). Relationship between the sludge settling characteristics and the parameters of activated sludge system. PhD Dissertation. New Orleans University. USA.
- RÖSSLE, W.H., VAN DER MERWE, W., CHAPMAN, A., CHUEU, L.S., PRETORIUS, W.A. (2009). Research on activated sludge settling behaviour bases on short-term temperatura variations. Report Nº 1340/01/09-Water Research Commission. Department of Chemical Engineering. University of Pretoria. Sur Africa.
- SAWYER, C., MCCARTY, P., PARKIN, G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. 4º Edición. McGraw Hill Interamericana. Colombia.
- SILVERSTEIN, J. & SCHROEDER, E. (1983). Performance of SBR activated sludge process with nitrification/denitrification. *JWPCF*, 55, (4), 377-384.
- WETT, B., JIMENEZ, J.A., TAKAES, I., MURTHY, S., BRATBY, J.R., HOLM, N.C., RÖNNER-HOLM, G.E. (2011). Models for nitrification process design: one or two AOB populations. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 64, Nº 3, 571-576.
- WILDERER, P., IRVINE, R., DOELLERER, J. (EDIT.) (1997). Sequenced batch reactors technology. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, Nº 1.
- WILDERER, P., IRVING, A., GORONSY, M. (2001). *Sequencing batch reactors technology*. IWA Publishing, Alliance House, 12 Caston Street, London, SW1HOQS, UK.