

Treatment for domestic wastewater by using aerated ponds

Carmen Cárdenas, Tomás Perruelo, Douglas Fernández, Rafael Quero, Eduardo Chávez, Luisa Saules y Lenín Herrera

*Centro de Investigación del Agua, Instituto de Investigaciones Petroleras, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado 98, Maracaibo, Venezuela.
Telfs. (0261) 7597182 – 7185 – 7187 – 7195. Fax. (0261) 7597181.
E-mail: chcarden@luz.ve*

Abstract

The study was undertaken using a pilot plant of aerated ponds which consists of two systems called A and B, each one with three-tank system in series in order to evaluate the performance of the plant. The biochemical oxygen demand (BOD_{5,20}) and soluble biochemical oxygen demand (BOD_{soluble}), at the outlet of the A system, were 20 mg/L and 6 mg/L, respectively, very similar to those obtained from the B system where their values were 15 mg/L and 5 mg/L, respectively, this means that they can be achieved the same removal levels for both the A system, with one-day retention time in each pond and for the B system, with two-days retention time in each pond. The removal of chemical oxygen demand (COD) for both A and B systems were very similar, 81 and 85%, respectively. The data obtained from the different species of nitrogen at the effluent from the two systems of aerated ponds demonstrated that were an effective nitrification process. The biological treatment in aerated ponds is adequate to handle this kind of wastewater, since it is possible to get, with a single pond, a removal to 91% of the organic load in terms of BOD with one-day retention time.

Key words: Wastewater, biochemical oxygen demand, aerated ponds, removal, biological treatment.

Tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lagunas aireadas

Resumen

El estudio se llevó a cabo utilizando una planta piloto de lagunas aireadas, conformada por dos sistemas A y B (cada uno integrado por tres lagunas en serie), con la finalidad de evaluar el funcionamiento, operación y control de la planta. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20}) total y soluble en la salida del sistema A fueron 20 mg/L y 6 mg/L respectivamente, muy similares a las obtenidas en el sistema B, donde los valores fueron de 15 mg/L y 5 mg/L respectivamente. Se alcanzaron los mismos niveles de remoción de la DBO tanto para el sistema A, con un tiempo de retención de 1 día en cada laguna, como para el sistema B con tiempo de retención de 2 días en cada laguna. Los porcentajes de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en los dos sistemas A y B fueron muy similares, 81% y 85%, respectivamente. Los resultados de las diferentes especies de nitrógeno en el efluente de los dos sistemas indicaron que el proceso de nitrificación fue eficiente. El tratamiento biológico en lagunas aireadas es eficiente para tratar este tipo de aguas residuales, puesto que con un tiempo de retención de un día, se logró una remoción del 91% de la carga orgánica, en términos de DBO, con una sola laguna.

Palabras clave: Aguas residuales, Demanda bioquímica de oxígeno, Lagunas aireadas, Remoción, Tratamiento biológico.

Introducción

Las aguas residuales antes de ser vertidas a las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas al límite de evitar que su disposición provoque problemas graves de contaminación en el cuerpo de agua receptor [1, 2].

Las lagunas aireadas tienen ventajas considerables sobre el proceso tradicional de utilización de lodos activados, principalmente por su bajo costo, simplicidad y flexibilidad operacional, además del hecho de que el área de terreno que ocupan no supera el 10% de la utilizada en las lagunas de estabilización [2-5].

El sistema de lagunas aireadas es un tipo de tratamiento para líquidos residuales que se adapta fácilmente a regiones de climas cálidos. Es una alternativa de tratamiento frente a los problemas de malos olores, baja eficiencia y la necesidad de grandes extensiones de terreno [2].

El desarrollo del proceso del sistema de lagunas aireadas ha marcado un avance importante en el tratamiento secundario de aguas residuales, ya que es un proceso biológico en el cual los organismos aerobios y los sólidos orgánicos, presentes en las aguas residuales, se mezclan íntimamente en un medio favorable para la descomposición aerobia de los sólidos. La eficiencia del proceso depende de que se mantenga el oxígeno disuelto durante todo el tratamiento. El fundamento de este proceso es su capacidad para reducir la carga orgánica del agua residual a valores tolerables antes de descargarla a los cuerpos de aguas receptores [1, 5, 6].

En 1987, utilizando lagunas aireadas, se obtuvo en Israel, para un tiempo de retención teórico de 3,5 días, una eficiencia de 91% en la remoción de DBO soluble. La concentración de sólidos suspendidos se mantuvo entre 200-280 mg/L [4,7,8].

Lagunas aireadas operando en plantas de Israel [4] presentaron eficiencias de remoción variables de DBO, con valores en el rango de 35-81% con un tiempo de residencia promedio de 3,45 días, en verano y entre 31-73%, con tiempo promedio de residencia de 4,3 días, en invierno [2, 8-10].

El comportamiento de un sistema de lagunas aireadas fue evaluado durante 18 meses (1993-1994) en Santiago Poniente (Chile), para tratar aguas servidas de una población aproximada de 130.000 habitantes. Las características del efluente con tiempo de retención de 2,5 a 3,5 días fueron: 120-200 mg/L en DBO total, entre 10-30 mg/L en DBO soluble, y entre 200-300 mg/L de sólidos suspendidos, con eficiencia de remoción de 50-60% para DBO total, 87-91% para DBO soluble y un incremento de los sólidos de 15-49% con respecto al afluente [2, 4].

En el Estado de Río Norte, Brasil, fue evaluado durante 13 meses (Enero 95 - Enero 96) el comportamiento de un sistema de lagunas aireadas para tratar los efluentes líquidos de una industria de refrescos. El sistema mostró, para un tiempo de retención de 10 días, una remoción de DBO soluble de 75%, DBO total de 65% y DQO total de 61% [8,9].

Históricamente la aireación en las lagunas fue utilizada para impedir el crecimiento excesivo de algas y el apareamiento de condiciones producidas por sobrecarga orgánica y variaciones estacionales de temperatura. De esta experiencia se encontró que las lagunas aireadas mantienen una remoción de DBO aceptable en períodos de retención más cortos que en lagunas sin aireación. [2, 3, 5, 6, 11].

En cuanto a su aplicación, este proceso es muy eficaz para tratar aguas residuales domésticas y en particular desechos industriales, sobre todo aquellos que por su aspecto físico de coloración no pueden tratarse en lagunas facultativas [2, 10, 11].

En Venezuela se conoce la construcción de sistemas de lagunas aireadas para tratar aguas residuales domésticas (Mene Grande, Edo. Zulia), desechos de industria procesadora de maíz (Chivacoa, Edo. Yaracuy), efluentes de industria lechera (Sur del Lago, Edo. Zulia), sin embargo, la información bibliográfica técnica sobre los reportes de operación de esos sistemas es escasa.

La finalidad de este trabajo es evaluar a escala piloto el uso de lagunas aireadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas, con características típicas de nuestro medio, bajo condiciones ambientales del trópico, para obtener

critérios aplicables al diseño, operación y control de las mismas.

Metodología

Descripción del sistema a escala piloto

Se utilizó un sistema de lagunas aireadas de mezcla completa, llamadas también lagunas aireadas de biomasa en suspensión, en el cual, la presencia de algas no es aparente. Esto puede considerarse como un proceso incipiente de lodos activados, sin separación y recirculación de lodos. La densidad de la biomasa es considerablemente menor que en los procesos de lodos activados y para el dimensionamiento de las lagunas se relaciona el período de retención con la tasa de generación de sólidos activos, de modo que no se produzca un lavado de biomasa del sistema. No habiendo recirculación en este caso, el período de retención es igual a la edad de lodos [1, 9, 10, 12].

El sistema de lagunas aireadas se instaló en la entrada al sistema de tratamiento de lagunas de estabilización del Centro de Investigación del Agua de la Facultad de Ingeniería, ubicado en el núcleo agropecuario de la Universidad del Zulia.

Para la simulación del tratamiento biológico en la planta piloto de lagunas aireadas, se empleó el tipo de reactor mezcla completa con flujo continuo. El sistema de lagunas aireadas está conformado por seis (6) lagunas, distribuidas en dos subsistemas de tres lagunas en serie cada una (Figura 1), clasificadas de acuerdo a su tiempo de retención. El funcionamiento del sistema se inicia una vez que se extrae una porción del efluente del Colector "C" de aguas residuales domésticas de la ciudad de Maracaibo y es trasladado por medio de dos bombas peristálticas al sistema de lagunas aireadas. Las lagunas del sistema piloto son tanques cilíndricos de plástico (PVC), con una capacidad cada uno de 235 litros aproximadamente (0,89 m alto y 0,58 m θ).

El caudal de entrada para el sistema A fue de 64 mL/min para un tiempo de retención ($\theta = \theta_c$) de 48 horas y para el sistema B 128 mL/min para un tiempo θ_c de 24 horas. Para que el sistema funcionara eficientemente se dispuso de dos (2) compresores, que permitieron airear a cada una de las lagunas por medio de un equipo difusor, colocado en la parte inferior de las mismas y de esta forma lograr mantener los sólidos en su total suspensión [2, 6].

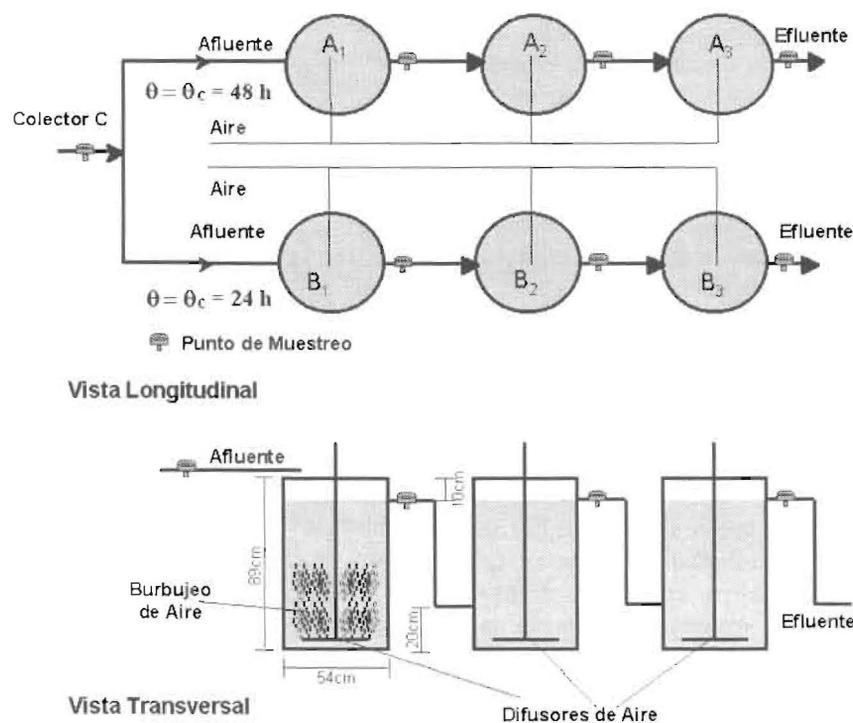


Figura 1. Representación longitudinal y transversal del sistema de lagunas aireadas.

Condiciones de operación y método de análisis

El rango de oxígeno disuelto medido en las lagunas osciló entre 4,5 mg/L y 7,0 mg/L. En este estudio no se optimizó la cantidad de oxígeno suministrado, sino que se trató de proveer un grado de agitación y turbulencia capaz de mantener los sólidos en suspensión, además de suministrar el oxígeno para oxidar la materia orgánica. Así mismo, se reportaron rangos de pH en el reactor entre 7,1 a 7,9 y temperaturas de 28 a 35°C, características propias de climas cálidos con diferencias entre la temperatura del agua en las lagunas y el aire de $\pm 2^\circ\text{C}$ [8, 10].

El sistema se operó durante seis (6) meses, una vez alcanzada las condiciones de equilibrio, es decir, una vez que la concentración de sólidos suspendidos en las lagunas y la DBO soluble del

efluente permanecieron relativamente constantes, presumiendo que la masa microbiana se encontraba adaptada a ese desecho; se efectuaron los muestreos de campo durante un periodo continuo de cinco semanas. En la determinación de los análisis realizados se utilizaron los métodos descritos en el Standard Methods for Examination Water and Wastewater [13].

Resultados y Discusión

En la Tabla 1, se observan los valores promedios de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y las diversas formas de Nitrógeno en los dos sistemas de lagunas aireadas.

Los sólidos suspendidos totales promedios de los efluentes de las lagunas de los sistemas

Tabla 1
Valores promedios de los parámetros evaluados en el sistema "A" y "B" de las lagunas aireadas a escala piloto

Resultados	Entrada	Laguna A ₁	Laguna B ₁	Laguna A ₂	Laguna B ₂	Laguna A ₃	Laguna B ₃
SST (mg/L)	89	185	121	170	98	124	61
SSV (mg/L)	68	139	89	126	71	90	40
SSV/SST (%)	76	75	74	74	73	72	65
DBO _{5,20} Total (mg/L)	143	35	29	26	21	20	15
DBO _{5,20} Soluble (mg/L)	—	13	11	9	7	6	5
(%R) DBO _{5,20} Soluble	—	91	92	94	95	96	97
DQO Total (mg/L)	401	333	214	230	156	183	114
DQO Soluble (mg/L)	393	125	135	113	78	74	58
(%R) DQO Soluble	—	68	66	71	80	81	85
Nitrógeno Total (mg/L)	35,25	33,71	32,28	32,56	31,69	31,74	30,67
NTK (mg/L)	35	9,4	7,4	7,4	6,0	6,3	4,7
N-NH ₃ (mg/L)	3,0	2,8	2,8	1,50	1,9	1,04	1,4
N-NO ₂ (mg/L)	0,05	1,81	1,38	0,46	0,29	0,24	0,07
N-NO ₃ (mg/L)	0,2	22,5	23,5	24,7	25,4	25,2	25,9
(%R) NTK	—	73	79	79	83	82	87
(%R) NH ₃	—	91	91	95	94	97	95

Observación: Los valores de remoción para las lagunas A₂, A₃, B₂ y B₃ son valores acumulados.
(%R) = Porcentaje de Remoción, NT= NTK+N-NO₃+N-NO₂

A y B se encontraron entre 185-124 mg/L y 121-61 mg/L, con un contenido volátil promedio de 75-65%, valores que están en el rango típico de lagunas aireadas con alto grado de mezcla. El incremento de la concentración de los sólidos en las lagunas, con respecto al afluente, es debido a la conversión de la materia orgánica afluente en biomasa en estas lagunas, de modo que una sedimentación de estos efluentes, lograría mejorar aun más la eficiencia de este sistema de tratamiento [4, 8, 9, 10].

Los resultados obtenidos de SSV también muestran el decrecimiento en su concentración en las dos series del sistema debido a la fase de decaimiento endógeno de los microorganismos provocado por el agotamiento del sustrato [1, 6, 10, 12, 14].

Al comparar los sólidos en los dos sistemas de lagunas aireadas, se denota que en el sistema A la cantidad de biomasa presente era superior que en el sistema B, debido a que en este último el tiempo de retención era el doble del tiempo de retención que en el sistema A, por consiguiente en el sistema B el licor mezcla se encontraba más diluido (Figura 2).

Los porcentajes de remoción de $DBO_{5,20}$ soluble para la primera laguna de los dos sistemas (A₁ y B₁) fueron de 91 y 92% respectivamente, mientras que las remociones de $DBO_{5,20}$ soluble en sistemas A y B fueron de 96% y 97% respectivamente. Los valores obtenidos de DBO para los efluentes de los dos sistemas fueron muy similares. Esto puede significar, que bajo las condiciones a las que se realizó este estudio, se logró la misma remoción en las tres lagunas con 6 días de retención en la serie A que con 3 días de retención en la serie B, ya que la diferencia en el porcentaje de remoción fue muy pequeña (Figura 3). Los valores de remoción conseguidos en este estudio con una sola laguna y un período de retención de un día, indican que estos sistemas pueden considerarse muy eficientes en climas cálidos, y se han reportados sistemas con series de más de tres lagunas y períodos de retención promedios de cuatro días, en los cuales se han alcanzado remociones de DBO soluble de 60-90% [2, 5, 9, 10, 15].

Con respecto a la DQO soluble, se puede afirmar que los porcentajes de remoción fueron muy similares para ambos sistemas, 81% Sistema A y 85% Sistema B (Figura 4), indicando que

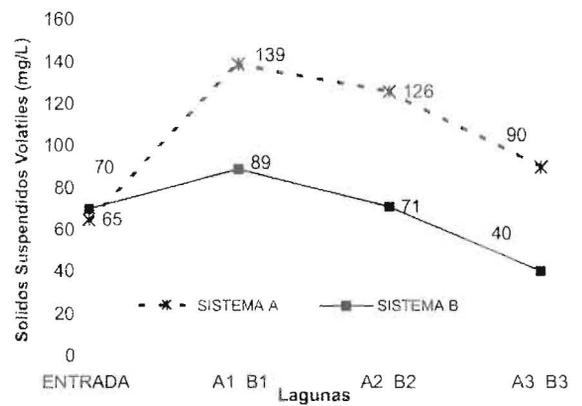


Figura 2. Valores promedios de concentración de Sólidos Suspended Volátiles (SSV) para los dos sistemas de lagunas aireadas.

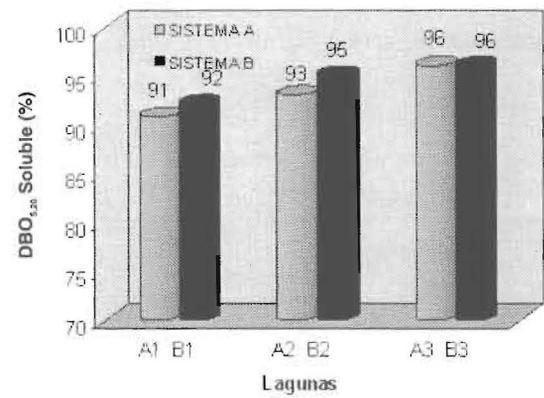


Figura 3. Valores promedios de los porcentajes de remoción de $DBO_{5,20}$ soluble para los dos sistemas de lagunas aireadas.

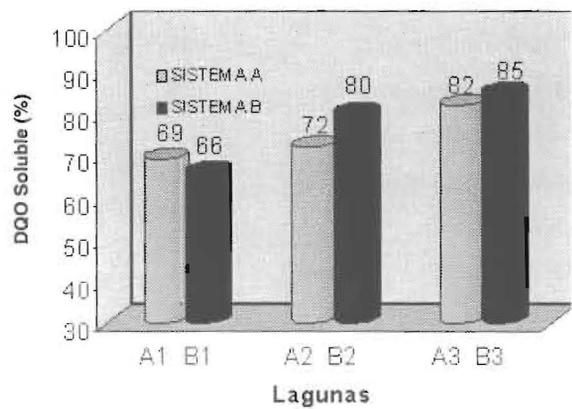


Figura 4. Valores promedios de los porcentajes de remoción de DQO soluble para los dos sistemas de lagunas aireadas.

los microorganismos pudieron adaptarse al medio y completar la oxidación de la materia orgánica [1, 12, 15, 16].

Los resultados obtenidos de nitrógeno total Kjeldahl y de nitrógeno amoniacal a lo largo de los dos sistemas A y B permitieron detectar el un decrecimiento de la concentración de las formas nitrogenadas, debido a las transformaciones de las especies del nitrógeno, presentes en las lagunas, a formas más oxidadas (Figura 5) [2, 10, 12, 17].

En las concentraciones de nitrito (Tabla 1), se evidencia un crecimiento desde la alimentación de los sistemas hasta la primera laguna, para luego disminuir lentamente hasta la tercera laguna, debido a que en la primera laguna el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitrito, mientras que en la segunda y tercera laguna el nitrito ha sido oxidado a nitrato [2, 3, 5, 16].

Al analizar los valores medidos para la concentración de nitrato (Figura 5), se percibe un incremento en su concentración, principalmente en la primera laguna, lo cual ha ocurrido como consecuencia de la oxidación del nitrógeno, connotando la existencia de la realización de un efectivo proceso de nitrificación. La diferencia entre los valores en la entrada de nitrógeno total (NTK+N-NO₂+N-NO₃) en los dos sistemas y la salida se puede atribuir al despojamiento de nitró-

geno amoniacal o arrastre de amoníaco debido a la alta agitación del agua residual en las lagunas [9, 10, 12, 17].

Cuando se comparan los valores de concentraciones de DBO_{5,20}, DQO y nitrógeno total Kjeldahl del sistema de lagunas aireadas con los límites establecidos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [18] para la descarga a cuerpos de agua (Tabla 2), se observa que los valores obtenidos cumplen con los valores tipificados en las normas, sin embargo, las concentraciones de nitrito más nitrato y los sólidos suspendidos totales están sobre los límites. Una intensa aireación en las lagunas, mantiene los sólidos en su total suspensión, por lo que se debe diseñar un proceso adicional al final del tratamiento para la remoción de los mismos del efluente [1, 5, 9, 12] y así facilitar el cumplimiento de la normativa establecida. La aireación, también proporciona grandes cantidades de oxígeno, contribuyendo al proceso de nitrificación, dando como resultado un efluente con altas concentraciones de nitrato. Sin embargo, a pesar de que este parámetro excede la normativa venezolana, en un tratamiento donde no se prevé el proceso de desnitrificación, es más recomendable descargar en un cuerpo de agua, un efluente con altas concentraciones de nitrato en lugar de amonio, ya que no resultaría tóxico a los peces, ni disminuiría la concentración de oxígeno disuelto.

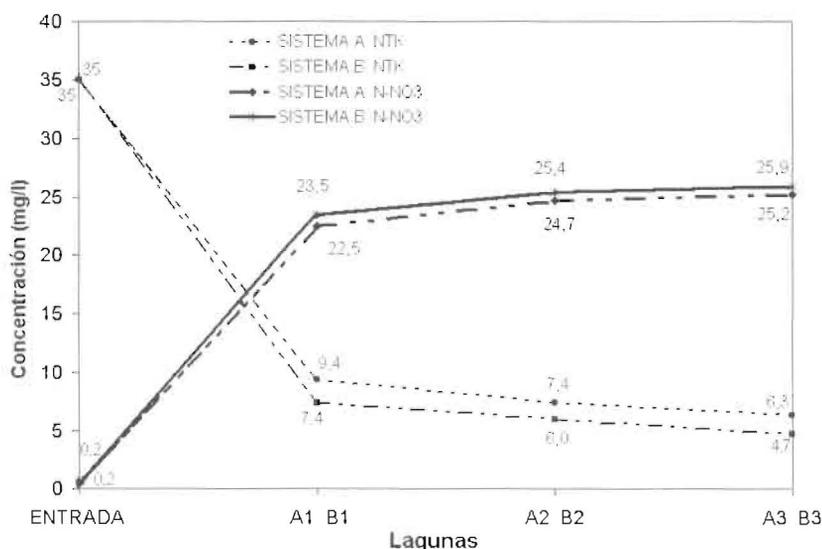


Figura 5. Valores promedios de concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Nitrato para los dos sistemas de lagunas aireadas.

Tabla 2
Comparación de los valores del efluente del sistema de lagunas aireadas con las Normas (M.A.R.N.)

Parámetros (mg/L)	Sistemas de lagunas aireadas		Normas (M.A.R.N.) *
	Sistema A	Sistema B	
DBO _{5,20}	20	15	60
DQO	183	114	350
N-Kjeldahl	6,3	4,7	30
N-(NO ₂ ⁻ +NO ₃ ⁻)	26	26	10
SST	124	61	80

*Limite para descargas de efluentes a cuerpos de agua, Gaceta Oficial de Venezuela Nro. 5021 Decreto N° 883, artículo 10, 1995.

Las características de este tipo de efluente lo hace muy recomendable para su reuso con fines agrícolas [1, 2, 9, 10, 12, 17].

Conclusiones

1. Las concentraciones de DBO soluble en la salida del sistema A de las lagunas aireadas fueron muy similares a las obtenidas en el sistema B, 6,3 mg/L y 4,7 mg/L respectivamente. Demostrándose que bajo las condiciones climáticas y de operación de este estudio, se logra en las tres lagunas en serie la misma eficiencia con 6 días de tiempo de retención que con 3 días de tiempo de retención.

2. De los resultados obtenidos de nitrógeno total Kjeldahl, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos a lo largo de los dos sistemas A y B, se pudo detectar un decrecimiento de la concentración del NTK y del nitrógeno amoniacal, y un aumento en la concentración de nitritos y nitratos, debido a un efectivo proceso de nitrificación que condujo a la estabilización del nitrógeno presente en las lagunas.

3. El tratamiento biológico de lagunas aireadas resultó muy apropiado para tratar este tipo de aguas residuales domésticas, y la eficiencia de este tratamiento en climas cálidos hace que se logre con una sola laguna, una remoción del 91% de la carga orgánica en términos de DBO_{5,20} soluble, con un tiempo de retención de un día.

4. Los valores de concentraciones de DBO_{5,20}, DQO y nitrógeno total Kjeldahl del sistema de lagunas aireadas obtenidos con este estudio cumplen con las normas establecidas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, para descargas a cuerpos de agua. Los valores de nitrito más nitrato estuvieron sobre los límites de la misma normativa, sin embargo, este efluente es altamente recomendable para su uso con fines agrícolas. Los sólidos suspendidos totales también se encontraron fuera de la norma, lo cual se debió a la alta aireación en las lagunas; efecto que puede minimizarse o eliminarse colocando un sedimentador después de las lagunas.

Agradecimiento

Se agradecen los aportes financieros otorgados por el Centro de Investigación del Agua (C.I.A.) y del Instituto de Investigaciones Petroleras de la Universidad del Zulia (INPELUZ) para la realización de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

1. Tchobanogloos, G: "Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización". Tercera Edición, McGraw, Inc. U.S.A, 1996.
2. Fernández, D y Quero, R: "Evaluación de lagunas aireadas a escala piloto". Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, 2000.

3. Katsiri, A: "Design optimization for dual power aerated lagoons". *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 59, 9 (1987), 820-829.
4. Mena, F; Duarte, A; Fuentes, D; Gosthe, A; Silva, O; Acevedo, S. y Curotto, V: "Lagunas aireadas: experiencia planta de tratamiento Santiago Poniente". XXV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS, Vol. 1, México, (1996), 17-24.
5. Yáñez, F: Curso sobre pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales: "Lagunas aireadas". Tomo II, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), Mérida, 1980.
6. Rivas, G: "Tratamiento de aguas residuales". 2^{da} Edición, Ediciones Vega, Caracas-Venezuela, 1978.
7. Sherrard, J.H. and Schroeder E: "Cell yield and growth rate in activated sludge". *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 45, 9, 1973, 959-968.
8. Guimaraes, P; Melo, H. Melo, J. and Farias, N: "Treatment of industrial effluents by aerated lagoon". XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS, Vol.1, México, (1996), 25-32.
9. Yáñez, F: "Lagunas de Estabilización. Teoría, Diseño, Evaluación y Mantenimiento. CEPIS, 1993, 145-190.
10. Romero, J: "Tratamiento de Aguas Residuales". 1^{ra} Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia, 2000, 527-655.
11. Manual de Disposición de Aguas Residuales: Origen, descarga, tratamiento y análisis de las aguas residuales. Tomo II. Publicado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 1991.
12. Arboleda, J: "Teoría y Práctica de la Purificación del Agua". 3^{ra} Edición. Tomos I y II. Editorial McGraw-Hill, Colombia, 2000.
13. APHA-AWWA-WEF: "Standard Method for the Examination of Water Wastewater". 18TH Edition, American Public Health. Assoc. Washington, DC, 1995.
14. Narasiah, K.; Mariam, M. and Shoyry, J: "Sludge accumulation in aerated facultative lagoons operating in colder climate". *Water Scientific Technology*. Vol. 22, N° 374, (1990), 77-82.
15. Benefield, L. and Randall, C.: "Biological process design for wastewater treatment". Prentice Hall Inc., Primera Edición, Englewood Cliffs. New York, 1980.
16. Orozco, A. y Salazar, A: "Tratamiento biológico de las aguas residuales". Universidad de Antioquía. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ing. Sanitaria. Editorial: Centro de Servicios Técnicos (CESET) de la Facultad de Ingeniería. Medellín, 1985.
17. García, M.; García, M. y Cañas, R: "Nitratos, Nitritos y compuestos N-Nitroso". Serie Vigilancia 13, ECO, Metepec, México, 1994, 5-18.
18. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, Nro. 5021. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Decreto N° 883, artículos 10 y 4. Caracas, (1995).

Recibido el 19 de Marzo de 2001

En forma revisada el 25 de Junio de 2002