

Evaluation of dissolved air flotation unit for oil produced water

**Carlos Rojas¹, Nancy Rincón², Altamira Díaz², Gilberto Colina²,
Elisabeth Behling², Elsa Chacín² y Nola Fernández²**

¹Asuntos y Servicios Petroleros PETROSEMA S.A, Sub-Gerencia General, Calle 78 con Av- 4, Edificio Banco Unión Piso 7, Apartado 704. Maracaibo 4002, Venezuela. subgerenciageneral@petrosema.com, rojascar4@cantv.net, Fax 2617926477.

²Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado 526. Maracaibo 4001-A, Venezuela. ncrincon@luz.edu.ve. nancycomotorincon@hotmail.com Fax. 00582617598743

Abstract

In this investigation a dissolved air flotation system was evaluated. The reactor used was to the lab scale. The Flotation system was used for the treatment of production oil waters, from a separator API located at the Patio Tanks ULE, in Tía Juana Zulia (Venezuela). The samples were characterized by determining parameters such as: pH, chloride, alkalinity, turbidity, suspended solids, oil and grease. The optimum coagulants dosage, and the coagulant to be used were evaluated by the "Jar Test", using commercial chemical coagulants to help the flotation process in a dissolved air environment. The results showed that, the Cationic Flocculant of High Molecular Weight (FCAPM) was the most appropriated at a concentration of 0,006% in volume (3, 54 mg/L). The flotation tests were carried out at three different pressures (30, 40 and 50 psi), and for each condition the recycle percentage was varied (30 %, 40% and 50% of the feeding). The operational condition in which the best results were obtained were for pressure 40 psi and recycle percentage 40%, at this values the removal of oil and grease was 90%, suspended solids 72% and effluent clarification 70%.

Key words: Dissolved air flotation (DAF), production waters, oils and grease, suspended solids.

Evaluación de una unidad de flotación con aire disuelto para el tratamiento de aguas aceitosas

Resumen

En esta investigación se evaluó un sistema de flotación con aire disuelto (FAD) a escala de laboratorio, para el tratamiento de aguas aceitosas de producción, provenientes del separador API N°5 ubicado en el patio de Tanques ULE, en Tía Juana estado Zulia (Venezuela). Se caracterizaron las muestras determinando parámetros como: pH, cloruro, alcalinidad, turbidez, sólidos suspendidos, aceites y grasas. En pruebas preliminares de clarificación (pruebas de jarras) utilizando coagulantes químicos comerciales, se seleccionó la dosis óptima y el coagulante a ser utilizado como coadyuvante del proceso de flotación con aire disuelto, resultando el Floculante Catiónico de Alto Peso Molecular (FCAPM), el más adecuado con una concentración de 0,006% en volumen (3,54 mg/L). Las pruebas de flotación se llevaron a cabo a tres diferentes presiones (30, 40 y 50 psi), y para cada condición se varió el porcentaje de reciclaje (30, 40 y 50% de la alimentación). La condición operacional con la que se obtuvo mejores resultados fue a 40 psi y 40% de reciclaje, mostrando porcentajes de remoción de 90% de aceites y grasas, 72% de sólidos suspendidos y 70% de clarificación del efluente.

Palabras clave: Flotación con aire disuelto (FAD), aguas de producción, aceites y grasas, sólidos suspendidos.

Introducción

En los procesos de producción petrolera, el agua eliminada de la deshidratación del crudo (aguas de producción), es posteriormente tratada para su reutilización como agua de inyección para la recuperación de pozos o para ser usada con otros fines dentro de la industria petrolera. Tradicionalmente, las técnicas para el tratamiento de las aguas de producción (aguas aceitosas) utilizan separadores API y separadores de placas corrugadas. Sin embargo, el volumen de agua obtenido luego de esta separación, es superior al empleado para los usos anteriormente nombrados, esto se traduce en un pasivo ambiental, debido a que la calidad de dichas aguas no cumplen con la norma venezolana de descarga al medio ambiente (Decreto 883) [1]. En los últimos años en algunos países incluyendo Venezuela se ha introducido la tecnología de flotación con aire disuelto para tratar las aguas aceitosas. Existen ventajas considerables a nivel de infraestructura y de costos, que hacen que el proceso de flotación sea una opción perfectamente viable para el tratamiento de las aguas aceitosas de producción [2, 3].

La flotación con aire disuelto es un método eficaz para eliminar partículas de baja densidad de una suspensión, para clarificar líquidos con baja turbiedad y en aguas altamente coloreadas donde se producen flóculos poco densos [4].

Estudios sobre el uso de esta tecnología en aguas municipales [3,5] y en aguas residuales industriales [2], han demostrado que la eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas, es superior a los métodos convencionales de tratamiento (separadores API, separadores de placas corrugadas), aunado a esto los tiempos de retención son menores y por ende los volúmenes de los equipos para tratar un caudal dado también lo son.

Este sistema se ha utilizado en el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas con lodos activados [6]. En 1971, Boyd y col. [7] utilizaron un FAD para separar aceite en una dispersión acuosa de un afluente de aguas residuales tratadas químicamente usando una planta piloto, al final de la experiencia se encontraron concentraciones de aceites entre 10-15 mg/L. Abo-Elela y Nawar [8] mostraron que el FAD pue-

de ser efectivo para remover DBO, DQO, y turbidez cuando se utilizan coagulantes como el alumbre y el cloruro férrico. Generalmente, es necesario promover la agregación de las partículas finas a través de la coagulación-floculación [9]. Takahashi y col. [10] notaron que la formación de gotas grandes en presencia de sales inorgánicas fue esencial para la rápida separación de emulsiones aceitosas. Estas investigaciones demuestran las ventajas que tiene promover el proceso de coagulación-floculación previo al tratamiento con el FAD.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar un equipo de flotación con aire disuelto (FAD) a escala de laboratorio, operado por carga, usando aguas de producción provenientes del separador API 5 del Patio de Tanques ULE y utilizando productos químicos comerciales (proceso coagulación-floculación) como coadyuvante del proceso de flotación.

Materiales y Métodos

Efluente utilizado

Las muestras de aguas de producción se tomaron a la salida del separador API 5 del Patio de Tanques ULE, el cual recibe la mezcla de aguas de producción de crudos pesados y medianos, provenientes de los demás separadores API (separadores API 1,2, 3 y 4) [11].

Ensayo de clarificación (prueba de jarras)

Previo al tratamiento con FAD, se efectuaron ensayos de jarras para la selección del producto químico y la dosis óptima que promoviera el proceso de coagulación-floculación de las muestras de aguas de producción. Se evaluaron 4 productos químicos (Tabla 1).

Se realizaron ensayos usando el agua de producción con cada producto por separado, variando la concentración desde 0,006% a 0,018% con incrementos de dosis de 0,004%, partiendo de la concentración recomendada por cada fabricante, esto con la finalidad de elegir el mejor producto a emplear en la investigación. Las pruebas se ejecutaron por triplicado para verificar la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Para cada prueba se usó 1000 mL de agua de produc-

Tabla 1
Descripción de los coagulantes-floculantes empleados en la investigación

Nombre comercial del coagulante	Descripción
FCAPM	Polímero líquido, tipo poliacrilamida de carga catiónica y alto peso molecular. Gravedad específica a 25°C: 1,08-1,18
PA	Polímero sólido, tipo poliacrilamida de alta carga catiónica y de alto peso molecular. Viscosidad a 25°C: 100-200 cps al 0,1%
FC	Polímero líquido coagulante-floculante. Polielectrolito. Gravedad específica a 25°C: 1,02-1,10
PAPM	Ayudante de coagulación, polímero líquido con alta densidad de carga catiónica. Gravedad específica a 25°C: 1,25-1,35

ción, se determinó el pH, la alcalinidad, la turbidez inicial, la concentración de SST, cloruros y la concentración de aceites y grasas. Luego, se agregó la dosis del producto a ensayar, se agitó a 150 rpm por 1 minuto (mezcla rápida), posteriormente, se disminuyó a 40 rpm por 20 minutos para promover la floculación (mezcla lenta), finalmente, se dejó en reposo por 30 minutos. Se determinó a las muestras clarificadas, la turbidez final y la concentración de aceites y grasas.

Se seleccionó el producto químico que permitiera el mayor porcentaje de clarificación y cuyo costo asociado fuese viable para garantizar un proyecto rentable, para la posterior aplicación del proceso de flotación con aire disuelto.

Equipo de flotación con aire disuelto utilizado

El equipo para evaluar la FAD a escala laboratorio consta de una celda de presurización ó cámara de saturación que consiste de un recipiente transparente plástico de 90 mm de diámetro externo y 270 mm de altura, el cual tiene dentro un agitador manual de acero inoxidable y un filtro de berea que funciona como difusor, para aumentar la superficie de contacto líquido-gas, tal como se muestra en la Figura 1; así mismo presenta a la salida una válvula reductora de presión que permite la liberación del líquido presurizado y a su vez tiene conexiones flexibles con acoples de rápida instalación-desinstalación; la unidad tiene en su tapa una empacadura (*o-ring*), liberador y medidor de presión con un rango de 0 a 200 psi.

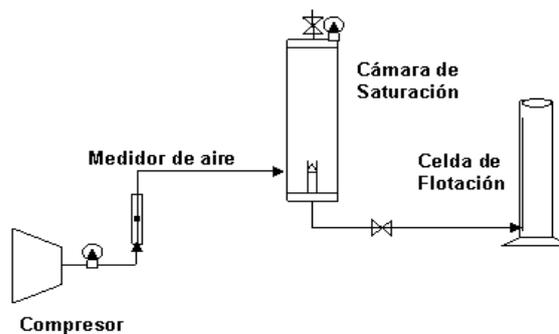


Figura 1. Equipo FAD, para pruebas de flotación a escala piloto.

Las condiciones de operación de la unidad fueron establecidas en base a la bibliografía consultada [2,3] el equipo de flotación con aire disuelto trabajó a 30, 40 y 50 psi con una variación de reciclo para cada uno de 30, 40 y 50% de efluente tratado. Durante la operación la temperatura fue la del ambiente (25°C). Una vez culminado el proceso de coagulación-floculación y saturada el agua de producción, se procedió a efectuar el ensayo de FAD, adicionando el agua a tratar en la cámara de flotación y ajustando las condiciones de operación seleccionadas. En ese momento se procedió a abrir la válvula reductora de presión ubicada a la salida de la cámara de saturación para liberar la presión hacia la celda de flotación, la misma indujo la formación de burbujas de ascenso que ayudó a la remoción del material sólido en suspensión y aceites y grasas presentes en la muestra. La eficiencia del proceso se calculó en función de los porcentajes de remo-

ción de estos parámetros como aceites totales y sólidos suspendidos medidos antes y después de los ensayos, los mismos se realizaron por triplicado, para su validez estadística.

Métodos utilizados

Los parámetros de caracterización del agua de producción fueron; turbidez (método nefelométrico), Alcalinidad (titulación), sólidos suspendidos (método gravimétrico), cloruros (método argentométrico), aceites totales (crudo total por extracción), el pH y la temperatura. Los métodos utilizados fueron los recomendados por el APHA-AWWA-WPCF, 1998 [12]. Para la evaluación de fluidos base agua se utilizó el método API-RP-13^a, del American Petroleum Institute [13].

Resultados y Discusión

Caracterización inicial del agua de producción proveniente del separador API 5

La Tabla 2 muestra los resultados de la caracterización realizada a las aguas de producción a la salida del separador API número 5 del Patio de Tanques ULE.

Al observar los valores de pH se ve poca variación entre todas las muestras tomadas, manteniéndose dentro de un rango de 7,6-7,9 unidades de pH. La medición de este parámetro es importante para el proceso de coagulación ya que la efectividad de los productos coagulantes- floculantes se ve afectada por el pH, sin embargo, en este caso, el pH no afectó el proceso ya que todos los productos empleados en los ensayos trabajan en un rango de acción entre 4-10 unidades de pH, según información suministrada por los fabricantes.

La temperatura varió entre 23,4 y 31,9°C, condiciones ambientales en el laboratorio, tal como lo muestra la Tabla 2, estos valores corresponden a mediciones efectuadas antes de realizar el tratamiento con FAD. La concentración del aire disuelto suministrada en los ensayos no estuvo completamente controlada, ya que las muestras fueron recolectadas en la industria de manera aleatoria simple, presentándose fluctuaciones en la temperatura (Tabla 2). El tiempo de saturación del volumen de reciclo se estimó en 15 minutos.

A pesar de las variaciones de las concentraciones de cloruros y de alcalinidad los cuales mostraron valores entre 1420-2370 mg/L de Cl- y 2050-2920 mg/L de CaCO₃, los coagulantes-floculantes utilizados no fueron afectados en su funcionamiento por estas variaciones.

Ensayos de clarificación (prueba de jarras)

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos con los diferentes productos utilizados para la coagulación-floculación.

Los valores de la Tabla 3 muestran que tres de los cuatro productos utilizados (FCAPM, FC, PAPM) dieron buenos resultados de clarificación para el tipo de aguas de producción utilizada, empleando bajas dosis, mientras que la poliacrilamida alcanza un 56% de clarificación valor relativamente bajo con respecto a los demás productos utilizados. Por otro lado se evidenció un comportamiento típico del proceso de clarificación con productos de alto peso molecular (PAPM y la poliacrilamida), los flóculos formados tienden a sedimentar y no a flotar, razón por la cual no pueden ser utilizados en un proceso de flotación.

Tabla 2
Condiciones iniciales del agua del separador API N° 5 del Patio de Tanques ULE

Muestra	T (°C)	pH	Cloruros (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Turbidez NTU	Aceites y grasas (mg/L)	Sólidos suspendidos (mg/L)
X ± DS	25,86±2,92	7,74±0,13	1802±350	2477±362	480±191	737±485	122±151
máximo	23,4	7,56	1370	2050	342	189	29
mínimo	31,9	7,97	2370	2950	958	1512	200

n = 10.

Los resultados obtenidos en la prueba de jarras permitieron determinar el tipo de coagulante-floculante y su concentración mínima operativa para el proceso de flotación con aire disuelto (FAD). La adición de coagulante permite el aumento de la eficiencia de la flotación para distintas aguas residuales, ejemplo de ello, es el estudio realizado por Tapia y Cázares [14], donde se reveló un aumento sustancial de la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas con el uso de coagulantes con base de aluminio.

Analizando las tendencias de los resultados obtenidos con los productos que funcionan para un proceso de flotación (FCAPM y FC), se puede notar que existe un patrón común de comportamiento de ambos (Figura 2).

La Figura 2 muestra la tendencia de la clarificación respecto a la concentración utilizada y puede observarse claramente que el porcentaje de clarificación tiende a disminuir al aumentar la concentración de los productos, este comportamiento normalmente se ve en procesos de clarificación cuando la efectividad del coagulante es alta y el rango de acción de los parámetros que la afectan, tal como la alcalinidad, pH y cloruros, es amplio. Dosis altas de coagulante tienden a desestabilizar los floculos, así lo indicó la investigación realizada sobre polímeros (polielectrolitos) en el Centro de Ingeniería Sanitaria, de Cincinnati, Estados Unidos, la cual concluyó demostrando que dosis excesivas de polielectrolitos producían dispersión en lugar de ayudar a la coagulación [15]. En la prueba de jarras se determinó

Tabla 3
Porcentajes de clarificación obtenidos en el ensayo de jarras, utilizando diferentes concentraciones de productos químicos en aguas de producción

mL/L solución	Porcentaje de clarificación			
	Floculante Catiónico de Alto Peso Molecular (FCAPM)	Poliacrilamida (PA)	Floculante Catiónico Poli E (FC)	Polímero de alto peso molecular (PAPM)
3	96 ± 24	52 ± 47	97 ± 67	98 ± 45
5	96 ± 32	27 ± 42	90 ± 67	68 ± 34
7	69 ± 25	7 ± 34	85 ± 64	57 ± 44
9	42 ± 21	56 ± 32	51 ± 44	-

n=3. Los muestras de tomaron de manera aleatoria simple.

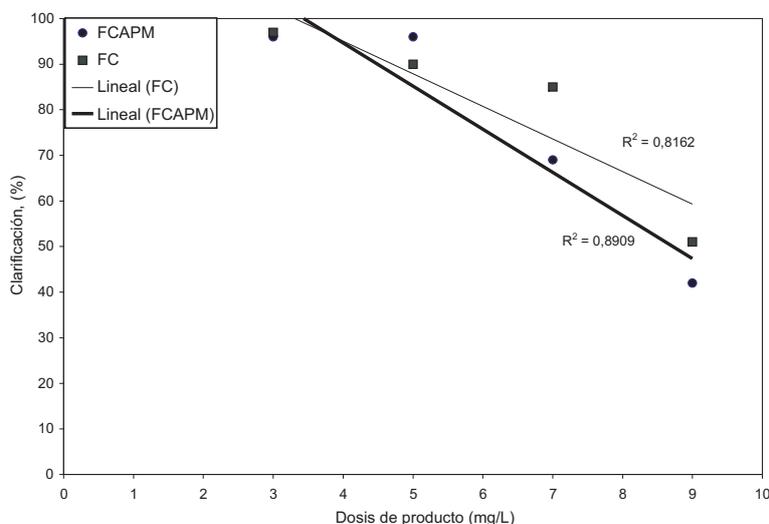


Figura 2. Porcentaje de clarificación respecto a la concentración de floculante utilizado.

que el producto adecuado es el FCAPM y la concentración máxima operativa es de 0,006 % en volumen (3,54 mg/L).

Flotación con aire disuelto. Influencia de las condiciones operacionales

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las pruebas realizadas para 9 condiciones operacionales, a fin de seleccionar la mejor condición de trabajo para el proceso de flotación.

De los resultados obtenidos se observa que la mejor condición operacional fue a la presión de

40 psi y 40% de reciclo, donde se obtuvo la mayor remoción de SST, aceites y grasas, evidenciando en esas condiciones operacionales un 69% de clarificación, 90% de remoción de aceites y grasas y 77% de remoción de SST.

En las Figuras 3 y 4 se muestran en forma gráfica la influencia de la presión y del reciclo, respectivamente, sobre la clarificación y la remoción de SST, aceites y grasas.

En general el comportamiento observado indica que el incremento de la presión hasta 40 psi favorece la remoción y la clarificación de las

Tabla 4
Porcentajes promedios de remoción a diferentes condiciones operacionales en el equipo FAD, usando 0.006% v/v de FCAPM

Presión (psi)	Reciclo (%)	Clarificación (%)	Remoción de aceites y grasas (%)	Remoción de SST (%)
30	30	50,70	70,00	44,83
30	40	59,12	87,50	62,33
30	50	59,16	84,34	54,58
40	30	63,91	80,00	67,23
40	40	69,25	90,00	77,23
40	50	72,07	85,00	72,23
50	30	69,33	83,33	54,33
50	40	67,44	79,33	50,33
50	50	66,99	66,67	37,67

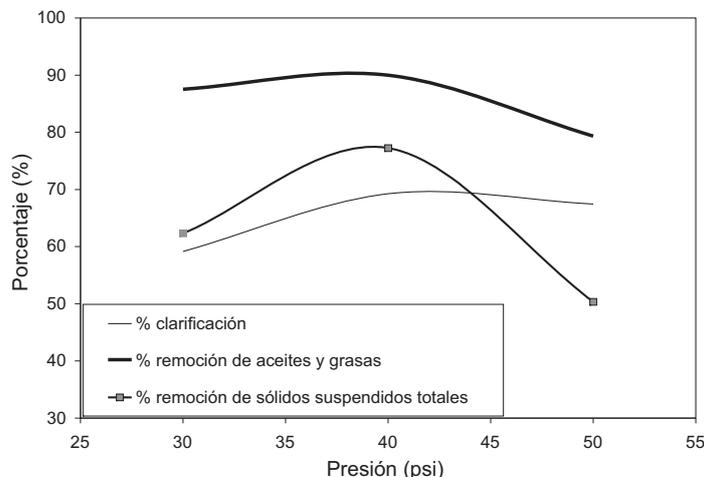


Figura 3. Efecto de la presión sobre la clarificación y la remoción de aceites y grasas, sólidos suspendidos totales en aguas de producción con empleo de FAD con 40% de reciclo.

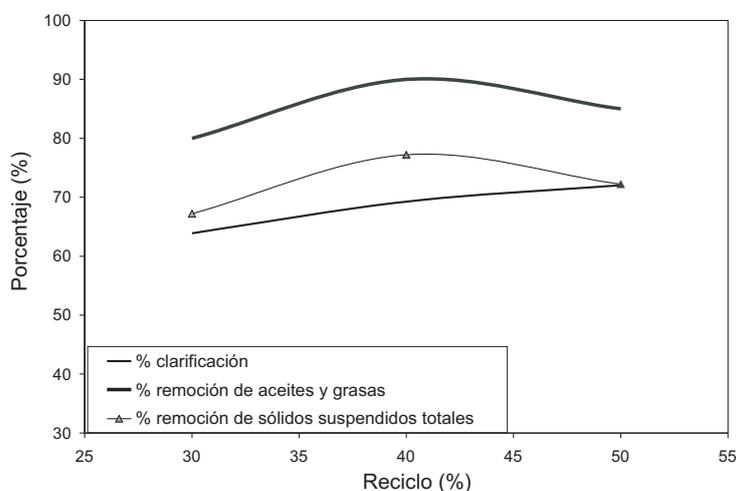


Figura 4. Efecto del reciclo en el porcentaje de clarificación y la remoción de aceites y grasas, sólidos suspendidos totales en aguas de producción con empleo de FAD con 40 psi.

muestras, revirtiéndose este efecto al aumentar la presión hasta 50 psi.

Al igual que la presión, el reciclo tiene el efecto de aumentar la remoción de SST, aceites y grasas hasta llegar a un punto de inflexión correspondiente a 40% de reciclo presurizado. Al incrementar el reciclo a 50% la eficiencia de remoción de los parámetros de interés disminuye.

Conclusiones

El proceso de flotación con aire disuelto resulta ser una alternativa eficiente en el tratamiento de las aguas de producción.

El tratamiento del agua de producción con productos coagulantes antes del proceso de flotación aumenta considerablemente la eficiencia del mismo.

Las condiciones operacionales con la que se obtuvo el mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas obtenido con el equipo de flotación con aire disuelto a escala laboratorio fueron: 40psi de presión y 40% del reciclo tratado, con 90% de remoción de aceites y grasas y 77% en remoción de sólidos suspendidos.

Agradecimiento

Este trabajo se efectuó gracias al apoyo de la Empresa Asuntos y Servicios Petroleros PETROSEMA y el Fondo Nacional de la Ciencia y la Tecnología (FONACIT).

Referencias Bibliográficas

- Decreto 883. Gaceta oficial de la República de Venezuela. Caracas, 18 de diciembre de 1995. 5021, Extraordinaria, Sección III, p.p. 89-90. 1995.
- Sulbarán, F. Evaluación de los equipos de separación de crudo en agua. Trabajo de ascenso para la categoría de Especialista en Ingeniería Ambiental. División de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 1992.
- Trujillo, A. Desarrollo de una unidad semipiloto de flotación con aire disuelto. Evaluación de los parámetros de diseño. Trabajo de Grado. División de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 1993.
- Gregory R, Zabel T. In: Pontius FW, Water quality and treatment, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 367-453, 1990.
- Bulacia, R. Tecnología avanzada de flotación por aire disuelto reemplaza y optimiza sistemas tradicionales en tratamiento de efluentes municipales, industriales y obtención de agua potable. Krofta Callejón de las Bugambilias Guadalajara, Jalisco, No. 1208 4, 45110, México. 1997.
- Offiringa G. Dissolved air flotation in Southern Africa. Water Sci Technol 31(3-4):159-172, 1995.

7. Boyd JL, Shell GL, Dahlstrom DA. Treatment of oily wastewater to meet regulatory standards. AIChE Conference, Toledo, OH, 1971
8. Abo-Elela SI, Nawar SS. Treatment of wastewater from an oil and soap factory via dissolved air flotation. *Environ Int*, 4: 47-52 1980.
9. Al-Shamrani, A. A., James A., H. Xiao. Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation. *Water Research* 36. 1503-1512. 2002.
10. Takahashi T, Miyahara T., Nishizaki Y. Separation of oily water by bubble column. *J. Chem. Eng. Jpn.* 12(5). 394-399. 1979.
11. Soto, M. Evaluación del sistema de crudo recuperado de las unidades de clarificación de los patios de tanques ULÉ y F-6. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 2002.
12. APHA-AWWA-WPCF. Standard Methods for the examination of water and wastewater. Edición 20. Washington DC. 1998.
13. American Petroleum Institute (API). API Specification OBM -13 A (SPEC 13A), Fifteenth Edition. 1993.
14. Tapia, A. y Cázares, E. Comparación de los modelos cinéticos para flotación con aire disuelto. *Ecología y agua del noroeste*, S.A. de C.V. Culiacán, Sinaloa. 2003.
15. Arboleda Valencia, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera edición. Tomo I. Editorial McGraw Hill. Teoría de la coagulación del agua. Capítulo 2. p.p.21-88. 2000.

Recibido el 30 de Octubre de 2006

En forma revisada el 10 de Septiembre de 2007