

Post-treatment of municipal wastewater for feeding to boilers using ionic exchange

Edixon Gutiérrez¹, Yaxcelys Caldera², Franz Valbuena³ y Samuel Silva³

¹Centro de Investigaciones del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apartado 98, Maracaibo, Venezuela. Telf. (0261) 7597182. Fax 7597181. egutierr@cantv.net.

²Laboratorio de Investigaciones Ambientales, Núcleo Costa Oriental del Lago (LIANCOL), Universidad del Zulia. Cabimas, Venezuela. Fax (0261) 2411210. yaxcelysc@hotmail.com

³Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela

Abstract

The feasibility of the of ionic exchange process as treatment system of municipal wastewaters previously treated in a wastewater treatment plant, coming from the regions of Punta Cardón and Community Cardón, Punto Fijo, in the Falcon State, Venezuela, was studied with the purpose of produce water that fulfilled the physiochemical quality to be used in processes of vapor generation in a refinery. An experimental system composed by a cationic exchange with strongly acid resin (Amberlita IR-120) and anionic exchange with weakly basic resin (Amberlita IRA-68) were used. During the treatment, the following parameters were evaluated: conductivity, pH, alkalinity, total hardness (TD), dissolved total solids (DTS), calcium, magnesium, sodium, silica, chloride, bicarbonate and carbonate. The results demonstrated the technical feasibility of the ionic exchange process to treat municipal wastewater previously treated in a wastewater treatment plant to produce water that can be used as feeding to boilers of medium pressure. Total hardness valor was not appreciable after of treatment, while the valor of the ions Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_2 , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} were lower that the tap water.

Key words: Ion exchange, anionic resin, cationic resin, municipal wastewater, water for boilers.

Post-tratamiento de aguas residuales municipales para alimentación a calderas utilizando intercambio iónico

Resumen

Se estudió la factibilidad del proceso de intercambio iónico como sistema de tratamiento de aguas municipales, previamente tratadas en una planta de tratamiento de aguas servidas, provenientes de las regiones de Punta Cardón y Comunidad Cardón de la población de Punto Fijo, en el estado Falcón, Venezuela; con la finalidad de producir aguas que cumplieran con la calidad fisicoquímica para ser utilizadas en procesos de generación de vapor en una refinera. Se utilizó un sistema experimental compuesto por un intercambiador catiónico con resina fuertemente ácida (Amberlita IR-120) y un intercambiador aniónico con resina débilmente básica (Amberlita IRA-68). Durante el tratamiento se evaluaron los siguientes parámetros: conductividad, pH, alcalinidad, dureza total (DT), sólidos disueltos totales (SDT). También se determinaron las concentraciones de los iones: calcio, magnesio, sodio, sílice, cloruro, bicarbonato y carbonato. Los resultados demostraron la factibilidad técnica del proceso de intercambio iónico para tratar aguas residuales municipales previamente tratadas y producir aguas que pueden ser utilizadas como alimentación a calderas de mediana presión. Después del tratamiento los valores de dureza fueron inapre-

ciables, mientras que los valores de los iones (Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_2 , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) fueron menores a los encontrados en agua potable.

Palabras clave: Intercambio iónico, resina aniónica, resina catiónica, aguas residuales municipales, agua para calderas.

Introducción

Menos del 0,26% de las fuentes de agua de la tierra son fácilmente accesibles como agua dulce en lagos, embalses y ríos para el uso humano y del ambiente. Las tasas de consumo de agua indican que la tercera parte de la población mundial experimentará grave escasez de agua en los próximos años, puesto que el abastecimiento de agua dulce en las fuentes está disminuyendo [1], debido a factores como: el crecimiento de la población, el incremento de la tasa de consumo, las condiciones climáticas y la contaminación ambiental [2]. Para minimizar el consumo de agua potable en los procesos de generación de vapor y refrigeración, un número cada vez mayor de usuarios industriales recurren a fuentes de aporte alternativas, como las aguas residuales ya sean municipales o procedentes de procesos industriales [3]. Sin embargo, se hace necesario un pretratamiento para las aguas de alimentación a las calderas, con la finalidad de reducir las impurezas (como trazas de calcio, magnesio y sílice) que pueden originar problemas de corrosión en los equipos, aplicándose el proceso de intercambio iónico como método efectivo para producir agua desmineralizada [4].

Hoy, el proceso de intercambio iónico tiene una amplia variedad de aplicaciones importantes en industrias tales como: farmacéuticas, procesadoras de alimento, médicas, hidrometalúrgicas, de síntesis químicas, de tratamiento de aguas, de producción de fibras sintéticas y cromotográficas [5]; para recuperar materiales valiosos de las aguas residuales, remover productos corrosivos y desmineralizar el agua [6]. También se ha empleado para remover de las aguas metales pesados como cadmio (Cd^{+2}), plomo (Pb^{+2}) y cromo (Cr^{+3}), por su toxicidad, cationes como hierro (Fe^{+3}), calcio (Ca^{+2}), y magnesio (Mg^{+2}), debido al olor color y excesiva dureza que originan, así como otras propiedades indeseables que le confieren al agua [7].

Algunos investigadores han mostrado los resultados del tratamiento de aguas residuales

municipales, con la finalidad de aprovecharlas en procesos. Yang [8] presentó los resultados de un estudio de monitoreo de corrosión localizada realizado en los sistemas de agua de enfriamiento de una refinería. La refinería programó la sustitución de la alimentación de agua potable en los sistemas de enfriamiento por aguas residuales municipales, con la finalidad de aprovecharlas. Los resultados demostraron la agresividad de las aguas municipales, frente a las aguas potables, presentando alto contenido de iones Cl^- , SO_4^{2-} y Ca^{+2} y evidenciándose corrosión en los equipos, del sistemas de enfriamiento, monitoreados cuando se alimentó agua residual municipal. Malakhov *et al.* [9] emplearon el proceso de intercambio iónico como sistema de tratamiento de aguas residuales municipales previamente tratadas por coagulación y alcalinización, con la finalidad de eliminar NH_4^+ y aprovechar estas aguas residuales como agua de reposición en los equipos de una central térmica. Como alternativa utilizaron un intercambiador catiónico con sodio. La tecnología de ablandamiento y desamonización no fue efectiva para remover otros parámetros de las aguas municipales pretratadas, siendo recomendado su uso sólo para ablandamiento.

El objetivo de este estudio fue evaluar la factibilidad técnica del proceso de intercambio iónico como sistema de tratamiento de aguas municipales, previamente tratadas en una planta de tratamiento de aguas servidas, con la finalidad de obtener aguas que cumplieran con la calidad fisicoquímica para ser utilizadas como aguas de alimentación a calderas, en una refinería.

Materiales y Métodos

Equipo experimental

Para realizar el estudio se utilizó un sistema de intercambio iónico a escala piloto (Figura 1), recomendado por los fabricantes de resinas, compuesto por dos columnas una con resina catiónica fuertemente ácida (IR-120) y otra con resina aniónica débilmente básica (IRA-68). Las co-

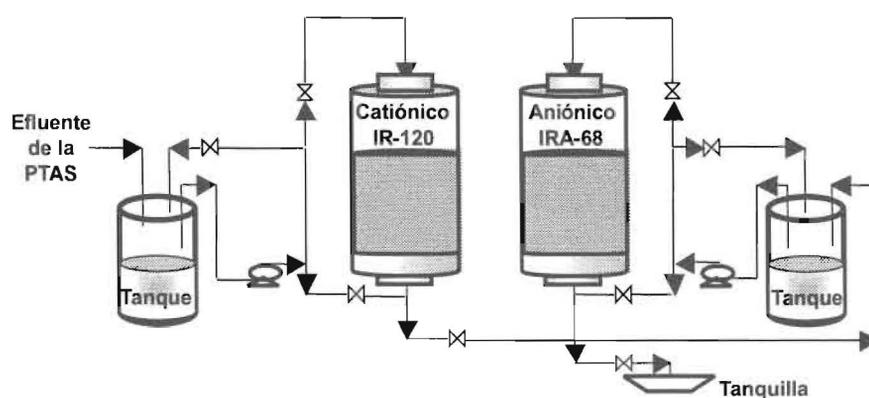


Figura 1. Sistema de intercambio iónico utilizado durante el tratamiento de las aguas residuales municipales previamente tratadas en la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

lumnas se fabricaron de vidrio, de diámetro interno 0,08 m y altura total 1,8 m; la altura del lecho fue de 1 m y el espacio entre la resina y la parte superior de 0,60 m.

Se utilizó una resina intercambiadora de cationes Amberlita IR-120, fuertemente ácida, tipo gel, de color amarillo claro, sintética, del tipo poliestireno conteniendo grupos funcionales sulfato, en la forma de hidrógeno y suministrada como partículas esféricas. La capacidad de intercambio fue de 1,9 eq/L como CaCO_3 y el tamaño efectivo de 0,50 mm. La resina intercambiadora de aniones Amberlita IRA-68 fue débilmente básica, de color blanco, tipo gel, conteniendo grupos funcionales amino terciarios dentro de la matriz acrílica, suministrada en forma de partículas esféricas de tamaño efectivo 0,45 mm con capacidad de intercambio de 1,32 eq/L como CaCO_3 .

Regeneración y regenerante

Después del proceso de intercambio iónico se procedió al lavado de las resinas. El lavado se realizó en contracorriente, para regenerar la resina catiónica IR-120 se agregó una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10%, mientras que la resina aniónica IRA-68 fue regenerada con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 4%.

Agua residual

Este estudio fue realizado con aguas residuales municipales provenientes de las regiones de Punta Cardón y Comunidad Cardón de la población de Punto Fijo del estado Falcón, Venezuela. Estas aguas fueron previamente tratadas

en una planta de tratamiento de aguas servidas (Figura 2) ubicada en una refinería en el estado Falcón.

Control y análisis del sistema

Se realizaron cinco pruebas de tratamiento, cada prueba tuvo una duración de 4 horas para cada columna (8 horas totales). La Tabla 1 presenta las condiciones de operación del sistema. Adicionalmente se realizó la prueba de saturación total de las resinas con la finalidad de obtener el comportamiento de equilibrio químico y cinético de las resinas utilizadas (IR-120 y IRA-68), para encontrar el punto óptimo de operación y de ruptura de las resinas.

Durante el estudio se analizaron los siguientes parámetros: pH (potenciometría), alcalinidad total (titulación), dureza total (titulación EDTA), conductividad (conductimetría), cloruros (volumetría), sulfatos y sílice (espectrofotometría), sodio, calcio y magnesio (espectrofotometría de absorción atómica), bicarbonato y carbonatos (titulación); tanto a la entrada como a la salida del sistema de intercambio según lo establecido en la metodología descrita en los métodos estándar [10].

Resultados y Discusión

La Tabla 2 presenta las características del agua proveniente de la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS), se puede observar que los valores de concentración de los cationes Ca^{+2} y Mg^{+2} , alcalinidad, dureza total y concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) son superior-

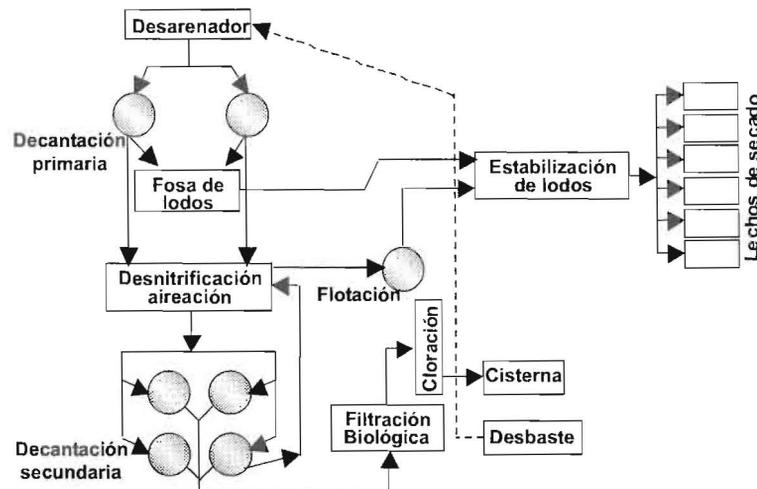


Figura 2. Esquema de la planta de tratamiento de las aguas servidas (PTAS) ubicada en la refinería, en el estado Falcón.

Tabla 1
Condiciones de operación del sistema de intercambio iónico durante el tratamiento de las aguas residuales municipales previamente tratadas en la PTAS

Parámetro	Resina catiónica Amberlita IR-120	Resina aniónica Amberlita IRA-68
Temperatura de operación	25 ± 1°C	25 ± 1°C
Presión de operación	20 psi	20 psi
Velocidad de retrolavado	20 L/h	20 L/h
Tiempo de retrolavado	15 min	15 min
Expansión del lecho	50%	50%
Regenerante y concentración	HCl, 10%	NaOH, 4%
Dosis de regenerante	5-7 L	5-7 L
Tiempo de regeneración	30 min	30 min
Volumen de enjuague	10-15 L	20-30 L
Capacidad de operación de la resina	0,223 eq CaCO ₃ /L	0,201 eq CaCO ₃ /L
Caudal de servicio	40 L/h	40 L/h
Tiempo de operación	4 h	4 h

res a los requeridos para aguas de alimentación a calderas de mediana presión. Por esta razón, estas aguas pretratadas requieren un tratamiento adicional antes de utilizarlas como aguas de alimentación a calderas, ya que se han reportado problemas típicos asociados a estos parámetros en los equipos de los sistemas de generación de

vapor cuando no se cumple con los requerimientos establecidos. Los cationes Ca⁺² y Mg⁺², son los principales causantes de las incrustaciones en los equipos, las altas concentraciones de SDT generan espumas en las calderas y la alta alcalinidad promueve la fragilidad del acero de las calderas [4].

Tabla 2
Características del agua residual municipal proveniente de la PTAS

Parámetro	Entrada al proceso de Intercambio iónico	Agua para calderas de mediana presión
pH	7,3 ± 0,2	8,0-10,0
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	122 ± 4,5	100,0
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	204 ± 20,4	1,00
Conductividad (Micromhos/cm)	1146 ± 89,3	-
SDT (ppm)	745 ± 58,0	500,0
Cl ⁻ (ppm)	105 ± 14,1	-
SO ₄ ⁼ (ppm)	81 ± 14,0	-
SiO ₂ (ppm)	6,6 ± 0,8	10,0
Na ⁺ (ppm)	68 ± 9,0	-
Ca ⁺² (ppm)	62 ± 4,0	0,0
Mg ⁺² (ppm)	13 ± 3,8	0,0
HCO ₃ ⁻ (ppm)	148 ± 5,5	-
CO ₃ ⁼ (ppm)	NA	-

NA: No apreciable.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros evaluados durante el tratamiento de las aguas residuales municipales provenientes de la PTAS. La resina catiónica Amberlita IR-20 mostró su carácter preferencial de intercambio por los iones Ca⁺² y Mg⁺², sobre el catión Na⁺, después de 4 horas de tratamiento. Los valores de las concentraciones de estos cationes disminuyeron desde 62 y 13 ppm, respectivamente, a valores inapreciables; mientras que la concentración del catión Na⁺ disminuyó desde 68 hasta 8,1 ppm.

Durante el tratamiento en el intercambiador catiónico el pH del agua disminuyó desde 7,3 hasta 2,3 esto se atribuye a las altas concentraciones de iones H⁺ producto del intercambio de los cationes [11].

La resina aniónica Amberlita IRA-68 mostró su selectividad por los aniones SO₄⁼, después de cuatro horas de tratamiento. Se observó una disminución de los valores de concentración desde 95,0 hasta 2,7 ppm. La reducción de la concentración del anión Cl⁻ fue menor, disminuyendo desde 99,9 hasta 22,0 ppm. El pH del agua incrementó a 8,8 producto del intercambio de iones OH⁻ por otros aniones.

Con la finalidad de determinar el comportamiento de equilibrio químico y cinético de las resinas utilizadas (IR-120 y IRA-68) se realizó la prueba de saturación de la capacidad total de la resina. La saturación de la resina catiónica tuvo una duración de 20,05 horas continuas, se procesaron 793,2 L de agua, a un caudal promedio controlado de 39,5 L/h, mientras que la saturación de la resina aniónica tuvo una duración de 19,6 horas y se procesaron 775,1 L de agua, a un caudal promedio de 38,8 L/h.

En la Tabla 4 se presentan los valores para el agua después del tratamiento en el sistema de intercambio iónico, también se muestran los valores para el agua potable de ciudad de Punto Fijo (que llega a la refinera) y para aguas de alimentación a calderas de mediana presión. Se puede observar que el valor promedio de las concentraciones de los SDT, después del tratamiento en el sistema de intercambio iónico, fue de 106,3 ppm menor a la concentración de SDT del agua potable (200,0 ppm) y al valor recomendado para aguas de alimentación a calderas de mediana presión (500,0 ppm). El valor promedio de la alcalinidad total (26,1 mg CaCO₃/L) fue menor al

Tabla 3
Resultados de los parámetros evaluados en el sistema de intercambio iónico durante el tratamiento de las aguas residuales municipales previamente tratadas en la PTAS

Parámetro	Salida del Intercambiador catiónico ($\bar{X} \pm S$)	Salida del Intercambiador aniónico ($\bar{X} \pm S$)
pH	2,3 \pm 0,0	8,8 \pm 0,4
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	NA	26,1 \pm 6,7
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	0,0	0,0
Conductividad (Micromhos/cm)	3013,2 \pm 317,4	163,6 \pm 79,8
SDT (ppm)	1958,6 \pm 206,3	106,3 \pm 51,9
Cl ⁻ (ppm)	99,9 \pm 10,9	22,0 \pm 12,5
SO ₄ ⁼ (ppm)	95,0 \pm 3,8	2,7 \pm 1,7
SiO ₂ (ppm)	5,7 \pm 0,8	2,6 \pm 1,0
Na ⁺ (ppm)	8,1 \pm 0,5	9,6 \pm 1,7
Ca ⁺² (ppm)	0,0	0,0
Mg ⁺² (ppm)	0,0	0,0
HCO ₃ ⁻ (ppm)	NA	29,7 \pm 9,2
CO ₃ ⁼ (ppm)	NA	6,5 \pm 2,7

X: Media aritmética. S: Desviación estándar. NA: No apreciable.

Tabla 4
Comparación de la calidad del agua después del tratamiento en el sistema de intercambio iónico

Parámetro	Salida del proceso de Intercambio iónico	Agua potable	Agua para calderas de mediana presión
pH	8,8	7,4-8,0	8,0-10,0
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	26,1	24,1	100,0
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	0,0	100,0	1,0
Conductividad (Micromhos/cm)	163,6	300,0	-
SDT (ppm)	106,3	200,0	500,0
Cl ⁻ (ppm)	22,0	35,0	-
SO ₄ ⁼ (ppm)	2,7	50,0	-
SiO ₂ (ppm)	2,6	5,0	10,0
Na ⁺ (ppm)	9,6	10,0	-
Ca ⁺² (ppm)	0,0	28,0	0,0
Mg ⁺² (ppm)	0,0	7,2	0,0

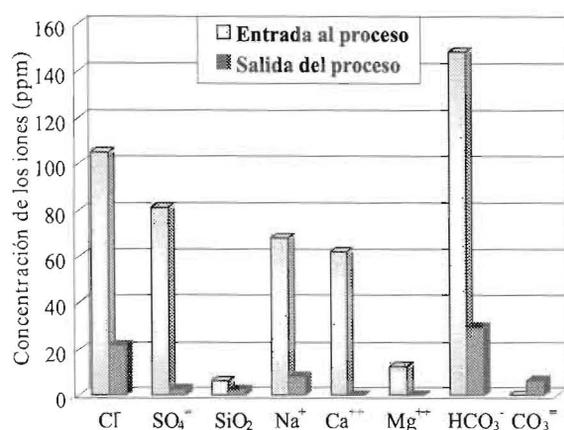


Figura 3. Concentraciones de los iones a la entrada y salida del proceso de intercambio iónico utilizado durante el tratamiento de las aguas residuales municipales previamente tratadas en la PTAS.

valor requerido para aguas de calderas de mediana presión (100,0 mg CaCO₃/L), mientras que se obtuvo un valor de 0,0 ppm de dureza. El valor promedio de la concentración de sílice fue de 2,6 ppm cercano al valor del agua potable (5,00 ppm) y menor al recomendado para aguas de alimentación a calderas de mediana presión (10,0 ppm). Estos resultados indican que el tratamiento por intercambio iónico de aguas municipales previamente tratadas es una técnica factible para producir aguas que puedan ser utilizadas como aguas de alimentación a calderas de mediana presión. Las concentraciones de los iones (Cl⁻, SO₄²⁻, SiO₂, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) fueron menores a los valores obtenidos para el agua potable, indicando que el proceso de intercambio permite obtener aguas de buena calidad fisicoquímica al compararlas con las aguas potables, para los parámetros evaluados.

Las concentraciones de los iones (Cl⁻, SO₄²⁻, SiO₂, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ y CO₃²⁻) a la entrada y salida del tratamiento de intercambio iónico se presentan en la Figura 3, observándose la disminución de estos iones a la salida del proceso de tratamiento e indicando la efectividad del mismo.

Conclusiones

Los resultados demostraron la factibilidad técnica del proceso de intercambio iónico para tratar aguas municipales, previamente trata-

das, produciendo aguas que pueden ser utilizadas como alimentación a calderas de mediana presión.

Los valores de concentraciones promedio de los iones Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ fueron menores a los valores obtenidos en el agua potable, demostrándose la calidad del efluente tratado.

Después del tratamiento de intercambio iónico los valores de dureza total fueron inapreciables.

Agradecimiento.

Este proyecto fue realizado con apoyo del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES).

Referencias Bibliográficas

- Higgins P., Warnken J., Sherman P. y Teasdale P. "Survey of users and providers of recycled water: quality concerns and directions for applied research". *Wat. Res.* Vol. 36, (2002) 5045-5056.
- Luketina D. y Bender M. "Incorporations long-tern trends in water availability in water supply planning". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 46, No. 6-7, (2002) 113-120.
- Ascolese C. Bain D. y Soria M. "Selección de programas para proteger circuitos de refrigeración". *Ingeniería Química.* Vol. 6, No. 369, (2002) 135-143.
- González J., Peña J. y Susial P. "Tratamientos externos e internos del agua para calderas". *Ingeniería Química.* Vol. 6, No. 369, (2002), 147-156.
- Economy J., Domínguez L. y Mangun C. "Polymeric ion exchange fibers. *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 41, No. 25 (2002) 6436-6442.
- Nilchi A., Maragheh M. y Khanchi A. "Properties, ion-exchange behavior and analytical applications of cerium phosphate cation exchangers suitable for column use". *Separation Science and Technology.* Vol. 34, No. 9 (1999) 1833-1843.
- Sperry J. y Peirce J. "Ion exchange and surface charge on Montmorillonite Clay". *Water Environ. Res.* Vol. 71, No. 3 (1999) 316-322.

8. Yang B. "Real-time localized corrosion monitoring in industrial cooling water systems". *Corrosion*. Vol. 56, No. 7, (2000) 743-756.
9. Malakhov I., Poletaev L., Kosmodamianski V. y Gasanov A. "Substantiating the de-ammoniation technology selected for makeup water treatment systems at thermal power stations using urban wastewater. *Thermal Engineering*. Vol. 41, No. 8 (1994) 640-646.
10. APHA, AWWA, WCF. "Standard methods for examination of water and wastewater". 18th Ed. Washington, DC. (1992).
11. Inglezakis V., Hadjiandreou J., Loizidou M. y Grigoropoulou H. "Pretreatment of natural clinoptilolite in a laboratory-scale ion exchange". *Wat. Res.* Vol. 35, No.9 (2001) 2161-2166.

Recibido el 10 de Mayo de 2004
En forma revisada el 20 de Junio de 2005