

FACTIBILIDAD DE PROCESOS DE DEFLUORACIÓN PARA AGUAS DE ABASTECIMIENTO

Fulvio Mendoza Rosas y Jorge L. De Victorica Almeida

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria
04510 México, D.F., Tel. (5) 622-3320, fax (5) 616-2164

RESUMEN

El estudio de la enfermedad de los dientes conocida como fluorosis dental, ha dado la pauta para que desde inicios del presente siglo, se desarrollen métodos o técnicas que permitan reducir la concentración de fluoruros presentes en las aguas de abastecimiento, dado que dicha enfermedad es atribuida a la cantidad de fluoruros presentes en el agua. En México este problema es común, principalmente en algunas regiones del norte del país, en las que se han medido concentraciones mayores a 1.5 mg/L en las aguas destinadas al consumo humano, y aunque se han realizado acciones tendientes a resolverlo, los resultados no han sido del todo exitosos. Este aspecto fue el que condujo a la realización del presente trabajo, en el que se vierten los principales resultados de un estudio de factibilidad técnica-económica de las técnicas de la alúmina activada, carbón animal y nalconada, las cuales fueron seleccionadas después de haber realizado una evaluación previa de 7 de ellas indicadas en la literatura como eficientes para la defluoruración del agua de abastecimiento .

El estudio consistió en determinar para cada una de las técnicas, con base en un diseño estadístico experimental factorial de dos factores, los niveles de las variables que más afectan la reducción de la concentración de fluoruro presente en las aguas de abastecimiento y los costos de los tratamientos por concepto de los reactivos involucrados.

Del análisis estadístico de los resultados, fundamentado en un análisis de varianza y una comparación de medias por el método de comparaciones múltiples de Duncan, se

obtuvo que la técnica de la nalconada resultó ser la de menor costo; sin embargo con ella apenas se logra reducir la concentración de fluoruros hasta el límite de 1.5 mg/L que establece la norma (NOM-127-SSA1-1994); por lo contrario la técnica del carbón animal, aunque su costo es sensiblemente mayor, su eficiencia permite reducir la concentración de los fluoruros más allá del valor norma. Finalmente en lo que concierne a la técnica de la alúmina activada, aunque también es muy eficiente, su costo la restringe para su aplicación en México.

INTRODUCCIÓN

A principios de este siglo, se atribuía al contenido de hierro y calcio presente en el agua de abastecimiento, el manchado de los dientes que sufrían algunas personas; en 1926 el químico Frank Hannan encuentra que en realidad el responsable de este manchado era el contenido de fluoruros en dichas aguas, por lo que este fenómeno se conoce a partir de este momento como fluorosis dental.

El flúor no existe libre en la naturaleza, sino que se halla principalmente en la fluorita (CaF_2) y la criolita (Na_3AlF_6) y al pasar el agua subterránea por rocas constituidas por estos compuestos, los disuelve e incorpora. La concentración de flúor, por ende variará según el lugar; por ejemplo, el agua de mar suele contener 1 mg/L de fluoruros, el agua de pozos desde 0 hasta 50 mg/L y las aguas superficiales los contienen en menor proporción.

El estudio de la fluorosis dental ha permitido concluir que el esmalte manchado o fluorosis dental se produce sólo durante el período de calcificación de los dientes y no después. Esto es, después de los 10-12 años no se produce la fluorosis dental, ni se altera la estructura del esmalte, cualquiera que sea la ingestión de fluoruros. Una vez que se forman dichas lesiones del esmalte no pueden corregirse, ya que no existe un tratamiento médico o dieta que las elimine. El fluoruro parece ser el único agente causante de la fluorosis dental (Duran, 1980).

Por otro lado, también se encontró que en las áreas donde se presentaba fluorosis, el índice de caries dental en los niños era mucho más bajo que en las áreas donde no la había; cuando el nivel de fluoruros excede a 1.5 mg/L en el agua, se presenta el problema del esmalte manchado y cualquier incremento posterior no disminuye la incidencia de dientes cariados, pero sí incrementa la ocurrencia o severidad del manchado. Hay un punto óptimo, alrededor de una concentración de F^- de 1.0 mg/L, en el cual la aparición de fluorosis es mínima con la máxima reducción en caries dental. A niveles de concentración inferiores a 1 mg/L, se llegan a registrar algunos beneficios, pero no es tan apreciable la reducción significativa en la caries dental y principalmente si decrece la concentración. También se puede presentar fluorosis esquelética si un

individuo ingiere fluoruro a razón de 20 mg/d en un período de 20 años o más; esta dosis correspondería a un agua con una concentración de 10 mg/L y un consumo de 2 L/d (AWWA, 1988).

En la Tabla 1, se muestra una clasificación de la fluorosis dental.

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LA FLUOROSIS DENTAL DE ACUERDO CON EL CONTENIDO DE FLÚOR PRESENTE EN EL AGUA POTABLE.

F ⁻ (ppm)	% DE AVANCE DE LA FLUROSIS	Observaciones
<1.0	0 (normal)	El esmalte presenta el tipo usual de estructura, translúcido y semivítreo; la superficie es lisa, brillante y generalmente de un color blanco grisáceo pálido.
1.0-2.0	14-16 (muy leve)	Se observan pequeñas zonas blanco-opacas en la superficie del diente, presentándose brillantes cuando se humedecen por la saliva.
2.0-2.5	40-50 (leve)	Las zonas opacas y blancas abarcan el 50% de la superficie del diente, notándose estriaciones cafés muy tenues en los incisivos.
4.0-8.0	75 (moderada a severa)	Se comienzan a observar puntos amarillos y por lo general aparecen manchas cafés en casi toda la superficie del diente. Las superficies de desgaste están definitivamente marcadas.
8.0-14.0	80 (severa)	Se observan manchas anaranjadas, cafés o negras en casi todos los dientes, que generalmente confluyen a formar hoyos profundos, llegando a la "corrosión" del esmalte.

FUENTE: DURÁN, 1980

En 1970, la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos, realizó estudios en 104 entidades de la República Mexicana, con el propósito de determinar las diferentes

concentraciones de fluoruro presentes en forma natural, en el agua de consumo. Los resultados indicaron que sólo en 19 de las 104 entidades, se presentó una alta concentración del fluoruro (> 1 mg/L). Algunos resultados se muestran en la Tabla 2.

Estos datos sitúan el problema de la fluorosis dental en los grados de muy leve (14-16%) hasta el de moderada a severa (75%), pero es indudable la necesidad de atacar el problema. Sin embargo, hasta ahora es poco lo que se ha investigado en México sobre la remoción del fluoruro de las aguas de abastecimiento, lo que ha dado lugar a la realización de este estudio, que tiene como finalidad abordar este aspecto de la problemática y aportar una posible solución.

TABLA 2. CONCENTRACIÓN DE FLUORURO PRESENTE EN EL AGUA DE DIVERSAS ENTIDADES DE LA REPÚBLICA MEXICANA.

LOCALIDAD	CONC. MAX. DE FLUORURO (ppm)
Aguascalientes	2.6
Ensenada	1.4
Tijuana	3.0
Cd. Camargo	1.32
Parral	1.5
Chihuahua	2.8
Salamanca	1.98
Lagos de Moreno	1.5
San Luis Potosí	3.5
Hermosillo	1.1
Río Bravo	1.3
La Piedad	1.65

FUENTE: DURAN, 1980

METODOLOGÍA

Selección de las técnicas de defluoración

La selección de los procedimientos, factibles de aplicarse en México, se basó en un análisis técnico de las diferentes opciones encontrados en la literatura, considerando las posibilidades de reducir las concentraciones de los fluoruros al menos hasta el nivel de 1.5 mg/L que marca la norma mexicana como máximo en las aguas destinadas al consumo humano (NOM-127-SSA1-1994) y los siguientes criterios:

- * Disponibilidad de materia prima
- * Cantidad de lodos generados
- * Toxicidad de sustancias involucradas en el proceso
- * Regeneración de materiales
- * Cantidad de reactivos agregados al agua
- * Cantidad de operaciones unitarias o etapas involucradas en el proceso

De esta manera, se seleccionaron y evaluaron mediante pruebas de tratabilidad, los siguientes procedimientos, considerando como criterio principal su capacidad de remoción y versatilidad para aplicarse a los diferentes tipos de agua:

- * Técnica Nalconada
- * Adsorción con Alúmina activada
- * Adsorción con Carbón de Hueso o Carbón Animal
- * Adsorción con fosfato tricálcico (hueso sintético)
- * Adsorción con rocas de fósiles marinos tratadas con sulfato de aluminio.
- * Coagulación con lodo de fosfato de aluminio
- * Coagulación con lodo de silica-gel

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la evaluación técnica de los métodos arriba indicados, en la que se fijó de manera arbitraria, la escala de 0 a 10 para el primer concepto y para las restantes, se hizo una jerarquía de acuerdo con la importancia del concepto.

TABLA 3. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS MÉTODOS DE REMOCIÓN DE FLUORURO PRESENTE EN EL AGUA DE ABASTECIMIENTO.

CONCEPTO	TÉCNICA							Escala de comparación	* Criterio
	1	2	3	4	5	6	7		
Materia Prima	10	9	7	10	10	0	0	0-10	Mayor disponibilidad
Lodos	0	9	9	7	0	9	3	0-9	Menos lodos
Toxicidad	10	1	2	0	7	10	10	0-10	Menos tóxicos
Regeneración	0	5	5	5	0	5	0	0-5	Regeneración de materiales
Operaciones Unitarias	3	0	0	0	3	0	3	0-3	Menos etapas involucradas
Cantidad de Reactivos	3	2	2	0	2	1	3	0-3	Menos reactivos utilizados
Total	26	26	25	22	22	25	19		

*Lo indicado en el criterio es a lo que se da una mayor puntuación.

Técnica:

1. Nalconada
2. Alúmina activada
3. Carbón Animal
4. Fosfato tricálcico (hueso sintético)
5. Lodo de fosfato de aluminio
6. Rocas de fósiles marinos tratadas con sulfato de aluminio
7. Lodo de sílica-gel

Esta evaluación discrimina las rutas o en este caso los procesos de remoción de fluoruros no viables técnicamente, con base en los criterios de comparación ya

establecidos. Por lo tanto, de la tabla anterior se obtiene que las técnicas más viables son las de la alúmina activada y la técnica de la nalconada por resultar con mayores puntuaciones (puntuación establecida arbitrariamente), sin perder de vista que las técnicas con carbón animal y la de las rocas de fósiles marinos tratadas con sulfato de aluminio también podrían ser consideradas; sin embargo esta última no se consideró dadas las dificultades para conseguir los reactivos necesarios para las pruebas.

Diseño Estadístico Experimental

Para el desarrollo de la experimentación, se estableció un diseño estadístico experimental factorial de dos factores, completamente aleatorizado de efectos fijos, ya que permite en forma sencilla y confiable no sólo conocer el comportamiento de las variables estudiadas, sino además el efecto entre las variables.

La evaluación de los resultados se realizó en dos etapas; una mediante un análisis de varianza (ANOVA), con el que se definió si existen o no cambios en la variable de respuesta debidos a los diferentes niveles de tratamiento y luego mediante el método de intervalos múltiples de Duncan, para decidir qué nivel de los factores es el causante del cambio en la variable de respuesta.

Definición de Variables

Se consideró como variable de respuesta a la concentración residual y/o eficiencia de reducción de la concentración de fluoruros en el agua tratada. En cuanto a las variables independientes, se seleccionaron el pH, la alcalinidad, la concentración inicial de fluoruros en el agua (F_o^-), el tiempo de mezclado, la dosis de alúmina activada, la dosis de carbón animal y la dosis de sulfato de aluminio en los niveles mostrados en la Tabla 4.

Una vez determinados, por separado, los mejores niveles de las variables para cada técnica, se determinó mediante un diseño factorial de dos factores, cuál de las técnicas era más eficiente, fijando como variable de respuesta la concentración de fluoruro residual y como variables independientes, la técnica de remoción (Alúmina, Carbón, Nalconada) y el tiempo de mezclado en el intervalo de 0 a 90 minutos.

TABLA 4. NIVELES DE LOS FACTORES

FACTORES	TÉCNICA		
	ALÚMINA	CARBÓN	NALCONADA
PH	3, 4, 5, 6, 7 y 8	3, 4, 5, 6, 7 y 8	2, 4, 6, 8, 10 y 12
Tiempo de mezclado (min)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120	30, 60, 90 y 120
Fo ⁻ (mg/L)	2, 3 y 4	2, 3 y 4	2, 3 y 4
Dosis (mg/L)	500, 1000, 3000, 5000 y 7000	500, 1000, 3000, 5000 y 7000	Al ₂ (SO ₄) ₃ para: Alc. de 200: 395, 415, 435, 455, 475 y 495 Alc. de 300: 595, 625, 655, 685, 715 y 745 Alc. de 400: 790, 830, 870, 910, 950 y 990 Alc. de 500: 990, 1040, 1090, 1140, 1190 y 1240
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	-	-	200, 300, 400 y 500

RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran las eficiencias de reducción de la concentración de F⁻ en función del tiempo de mezclado. Al realizar el análisis estadístico, se obtuvo que la mayor eficiencia se obtiene con la técnica con carbón animal, mientras que con la de alúmina y la de la nalconada se obtienen eficiencias menores, pero similares entre ellas. Por otra parte, al observar la Figura 2 se nota que con las tres técnicas, en sus condiciones óptimas de dosis y pH, se obtienen concentraciones menores o iguales al valor norma (1.5 mg/L) y que los tiempos de mezclado necesarios son de 10, 40 y 60 minutos para las técnicas de la nalconada, del carbón animal y de la alúmina activada, respectivamente.

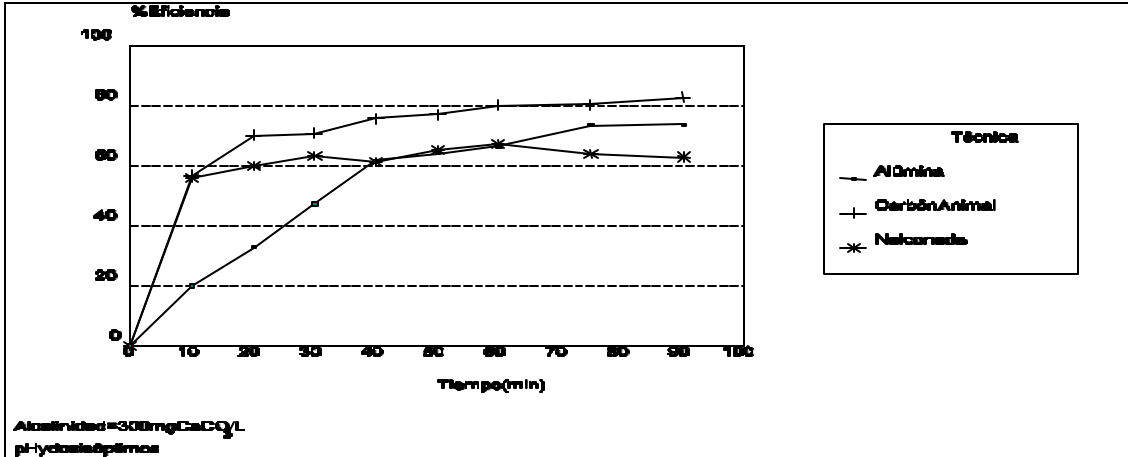


FIG. 1 EFICIENCIA DE REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE F⁻ PARA DISTINTAS TÉCNICAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO

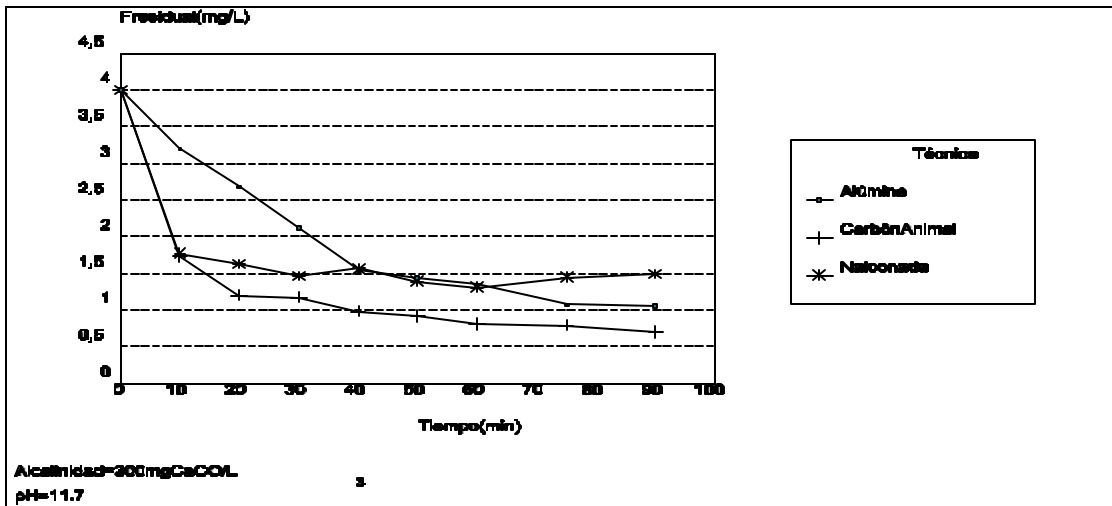


FIG. 2 F⁻ RESIDUAL PARA DISTINTAS TÉCNICAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLADO

CONCLUSIONES

Con las tres técnicas probadas (alúmina activada, carbón animal y nalconada) se logra una reducción en la concentración del fluoruro presente en el agua a niveles menores o iguales al nivel norma (1.5 mg/L), aún cuando el agua contenga una concentración inicial de fluoruros de 4 mg/L, y bajo las mismas condiciones fisicoquímicas (pH, alcalinidad y concentración de fluoruros), las mayores eficiencias de reducción se obtienen con la técnica de carbón animal; sin embargo, la técnica de la nalconada resultó ser la más económica desde el punto de vista de los costos por concepto de reactivos por unidad de volumen de agua tratada.

BIBLIOGRAFÍA

Adler H., Klein G. and Lindsay, F.K. "**Removal of Fluorides from Potable Water by Tricalcium Phosphate**". *Industrial and Engineering Chemistry*. 30(2): 163-165. February, 1938.

American Water Works Association. "**Water Quality and Treatment**". Fourth edition. McGraw-Hill, Inc; 1990.

Bargallo Modesto. "**Tratado de química inorgánica**". Ed. Porrúa, S.A. México, D.F., 1962.

Benefield, D. Larry; Judkins, J.F. and Weand, B.L. "**Process chemistry for water and wastewater treatment**". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632; 1982.

Bercadeeva, N.L.; Vakhnin, I.G. and Goronovskii, I.T. "**Use of Type A-1 Activated Aluminum Oxide for Defluoridation of Water**". *Soviet Journal of Water Chemistry and Technology*. 7(3): 121-123, 1985.

Bishop, P.L. and Sansoucy George. "**Fluoride Removal from Drinking Water by Fluidized Activated Alumina Adsorption**". *Journal AWWA*. 554-559. October, 1978.

Boruff, C.S.; Buswell, A.M. and Upton, W.V. "**Adsorption of Fluoride from Salts by Alum Flocc**". *Industrial and Engineering Chemistry*. 29(10): 1154, 1937.

Boruff, C.S. "**Removal of Fluorides from Drinking Waters**". *Industrial and Engineering Chemistry*. 26(1):69-71. January, 1934.

Comisión Nacional del Agua, CNA. "**Anteproyecto para Fluorizar el Agua Potable**

en el Estado de Baja California". 1984.

Commins, B.T. "**Controlling Fluoride Levels: A Literature Review**". Organización Mundial de la Salud, OMS., 1986.

Culp, R.L. and Stoltenberg, H.A. "**Fluoride Reduction at La Crosse, Kan**". *Journal AWWA*. 423-431. March, 1958.

Choi, W.W. and Chen, K.V. "**The Removal of Fluoride from Waters by Adsorption**". *Journal AWWA*. 562-570. October, 1979.

Duran C. Carmen. "**Fluoración en Abastecimiento de Agua Potable**". Tesis, Fac. Química, UNAM. México, D.F., 1980.

Guía de la Industria Química. Productos Químicos. Informática Cosmos, S.A. de C.V. México, D.F., 1991.

Iturbe A. Rosario. "**Riesgo de Contaminación al Subsuelo y al Acuífero en la Zona del Exlago de Texcoco por la Disposición de Lodos Provenientes de las Aguas Tratadas del Gran Canal**". Instituto de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 1995.

Joh De Zuane, P.E. "**Handbook of Drinking Water Quality. Standards and Controls**". Van Nostrand Reinhold. N.Y., 1990.

Komandenko, V.M. "**Water Defluorination with Aluminum Phosphate Sludge**". *Soviet Journal of Water Chemistry and Technology*. 11(5): 114-115, 1989.

Koval'chuk, L.I. "**Use of Silica Gel Sludge for Water Defluorination**". *Soviet Journal of Water Chemistry and Technology*. 11(7): 58-61, 1989.

Mac Intire, W.H. and Hammond, J.W. "**Removal of Fluorides from Natural Waters by Calcium Phosphates**". *Industrial and Engineering Chemistry*. 30(2): 160-162. February, 1938.

Maier, F.J. "**Defluoridation of Municipal Water Supplies**". *Journal AWWA*. 879-888. August, 1953.

Maier, F.J. "**Fluoruración del Agua Potable**". OPS/OMS. Ed. Limusa. Washington, D.C., 1971.

McKee, R.H. and Johnston, W.S. "**Removal of Fluoride from Drinking Water**".

Industrial and Engineering Chemistry. 26(8): 849-850, 1934.

Mendoza R. F. "**Estudio de Tratabilidad para Reducir las Concentraciones de Fluoruro en el Agua de Abastecimiento**". Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1998.

Molina Gustavo E. "**Curso sobre Remoción de Flúor y Arsénico de las Aguas para Consumo Humano**". Centro Ecológico Hombre y Salud OPS/OMS. México, 1987.

Montgomery Douglas C. "**Diseño y Análisis de Experimentos**". Grupo Editorial Iberoamérica, S.A. de C.V. México, D.F., 1991.

Norma Oficial Mexicana. "**NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización**".

Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la salud. "**Curso de Fluoruración: Eliminación parcial del Fluoruro y del Arsénico del Agua Potable**". Washington, D.C., E.U.A, 1977.

Poladyan, V.E.; Avlasovich, L.M. and Andrianov, A.M. "**Use of Shellrock Treated by Aluminum Sulfate in Water Defluorination**". *Soviet Journal of Water Chemistry and Technology*. 15(9): 35-37, 1993.

Portillo L. Lilia. "**Estudio Estadístico de la Deterinación de Fluoruros en Agua Potable por Espectrofotometría en el Visible**". Tesis, Fac. Química. México, 1992.

Rubel Jr. F. and Woosley, R.D. "**The Removal of Excess Fluoride from Drinking Water by Activated Alumina**". *Journal AWWA*. January, 1979.

Savinelli, E.A. and Black, A.P. "**Defluoridation of Water with Activated Alumina**". *Journal AWWA*. January, 1958.

Sociedad Mexicana de Salud Pública y la Organización Panamericana de la Salud. "**Informe del curso sobre Remoción de Flúor y Arsénico**". Cd. de Aguascalientes, Ags., del 26 al 30 de mayo de 1985.

Sposito Garrison. "**The Environmental Chemistry of Aluminum**". Second Edition, 1996.

"**Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**". 18th edition,

1992.

Stewart, J.C. "**Drinking Water Hazards: How to know if there are toxic chemicals in your water and what to do if there are**". Hiram, Ohio, 1990.

Tebutt, T.H.V. "**Fundamentos de Control de la Calidad del Agua**". Ed. Limusa, 3^a edición, 1990.

The Merck Index. "**An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals**". Published by Merck & Co., Inc. RAHWAY. Eleventh edition. N. Y. USA, 1989.

Thompson J. and Mc Garvey, F.X. "**Ion-Exchange Treatment of Water Supplies**". *Journal AWWA*. February, 1953.

Trelles, R.A.; Larghi Américo y Paéz, J.P. "**El Problema Sanitario de las Aguas Destinadas a la Bebida Humana con Contenidos Elevados de Arsénico, Vanadio y Flúor**". Universidad de Buenos Aires, Argentina. Instituto de Ingeniería Sanitaria, 1970.

Universidad Autónoma de Puebla. "**Curso sobre Fluoruración de los Abastecimientos de Agua Potable**". Lab. de Ingeniería Sanitaria, 1976.

Wu Yeun C. and Nitya Anan. "**Water Defluoridation with Activated Alumina**". *Journal of the Environmental Engineering Division*. 357-367. April, 1979.