

La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud

Exposure to aluminum and its relationship between environment and health

Rosabel Torrellas Hidalgo*

Fecha de recepción: 5 de julio de 2012

Fecha de aprobación: 13 de agosto de 2013

Resumen

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre. Aun cuando se ha demostrado su toxicidad, el control geoquímico mantiene su biodisponibilidad dentro parámetros inofensivos. Sin embargo, las modificaciones naturales y las intervenciones antropogénicas contribuyen a su liberación, aumentando la incidencia de enfermedades en la población y generando acumulaciones dañinas en el ambiente. Las fuentes más importantes de exposición no ocupacional al aluminio son los alimentos, el agua, ciertos medicamentos y cosméticos, así como los envases y utensilios utilizados para la preparación de los alimentos. El presente trabajo constituye una reflexión acerca de diferentes aspectos relacionados con la exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud.

Palabras clave: aluminio, salud, exposición, ambiente.

Abstract

Aluminum is the third most abundant element in Earth's crust. Although its toxicity has been demonstrated, geochemical control maintains its bioavailability in harmless parameters. However, natural changes and anthropogenic interventions contribute to its release into the environment which causes an increment of sicknesses in the population and harmful accumulations in environment. The most important sources of non-occupational exposure to aluminum are food, water, certain medicines and cosmetics, packages and utensils used for foods preparation. This paper is a reflection about different aspects related to exposure of aluminum and its relationship with the environment and health.

Keywords: aluminium, health, exposure, environmental.

Introducción

El aluminio, de número atómico 13 y símbolo químico Al, pertenece a los elementos del Grupo 13 de la tabla periódica. Es el tercer elemento más abundante de la corteza terrestre (8%), después del silicio (27,7 %) y el oxígeno (46,6 %). En su estado natural nunca se encuentra libre, sino combinado con elementos como el oxígeno, el flúor y el silicio, formando así minerales (Cotton y Wilkinson, 1989).

El aluminio es el elemento no ferroso de mayor uso en muchos sectores de la economía mundial. Su producción a gran escala data de hace más de 140 años, cuando se aplicó el proceso Bayer como método industrial para producir aluminio a partir de la disolución de bauxita en hidróxido de sodio y posterior tratamiento electro-

químico. Este proceso, aun cuando es costoso, es en la actualidad, y a nivel mundial, la forma industrial de obtener aluminio. Desde mediados del siglo XX, el aluminio ha sido el metal más utilizado, después del acero (Hind, Bhargava y Grocott, 1999).

La importancia industrial del aluminio radica en la versatilidad que le confieren sus propiedades físicas y químicas. Es un metal blando, de baja densidad, maleable, dúctil, de baja resistencia mecánica, poca tendencia a la oxidación en presencia de oxígeno, resistente a la corrosión y conductor de la corriente eléctrica. Su excelente relación peso/resistencia ha sido mejorada, mediante aleaciones para la construcción de aviones, vehículos y otros medios de transporte. Además, su maleabilidad le permite ser fundido y vaciado en diversos moldes para obtener laminados u hojas muy delgadas (Totten y MacKenzie, 2003).

1 Dra. en Química de Medicamentos, Universidad Central de Venezuela. Udana Inc. Houston, TX, USA. Correo electrónico: rosabel.torrellas@gmail.com.

El extendido uso del aluminio y de sus aleaciones abarca una gran variedad de productos. Los principales mercados del aluminio y sus aleaciones incluyen los materiales para envases, latas, papel de aluminio, empaques de alimentos y utensilios de cocina, entre otros. La industria de la construcción se vale de él para la fabricación de marcos de ventanas, puertas, cerraduras, canales de desagüe y revestimientos. Las industrias automotriz y aeroespacial utilizan aleaciones de aluminio para la producción de partes de automóviles, fabricación de aviones, cohetes, fuselajes, revestimientos y otros componentes. En cuanto al sector de los electrodomésticos, este emplea el metal a gran escala en la fabricación de neveras, lavadoras, secadoras, entre otros.

Por otra parte, su uso alcanza la elaboración de una variedad de aplicaciones químicas para la producción de pinturas y pigmentos a base de óxido de aluminio, abrasivos, refractarios, cerámicas, aislantes eléctricos, aleaciones, gemas artificiales, bujías, fibras resistentes al calor, combustibles para cohetes, aditivos, explosivos, entre otros. Las industrias farmacéutica, de alimentos y cosmética también utilizan preparados con aluminio, que incluyen conservantes, colorantes, agentes emulsionantes, anti-transpirantes, adyuvantes, recubrimiento de medicamentos, entre otros. Las sales de aluminio también se usan para la purificación del agua, la refinación de azúcar, la elaboración de cerveza y la fabricación del papel (Krewski, 2007).

Ahora, el aluminio es el único metal completamente reciclable. Actualmente, su recuperación se ha convertido en un importante aspecto de la industria mundial de producción de aluminio; más de siete millones de toneladas del metal se recuperan anualmente (Martchek, 2006). Cabe señalar que a pesar de los usos útiles de este metal en la sociedad actual, se ha encontrado una amplia gama de efectos tóxicos del elemento en relación con el ambiente y la salud humana (Krewski, 2007).

El aluminio en el ambiente

El aluminio se encuentra en el medio natural en la forma de la especie iónica Al^{3+} . En los suelos está combinado en minerales y rocas de aluminosilicatos (feldespatos, imogolita, caolinita), fosfatos (variscita), sulfatos (jurbanita) e hidróxidos (gibbsita) (Soon, 1993).

Desde el punto de vista químico, este ión de pequeño radio iónico ($0,50 \text{ \AA}$) y fuerte carga, produce un intenso campo eléctrico que atrae electrones. Las soluciones acuosas de las sales de aluminio son ácidas debido a la hidrólisis de la especie Al^{3+} (Cotton, 1989).

La concentración del ión Al^{3+} en las aguas es mucho mayor que la de otros cationes biológicamente importantes como el Mg^{2+} , Fe^{3+} o Zn^{2+} . El aluminio no es un elemento esencial para los organismos vivos de los ecosistemas y se ha encontrado que es un agente tóxico (Bondy, 2010; Lewis, 1989). La razón principal del porqué esta especie iónica tóxica no afecta a los organismos en su

ambiente natural se debe a que el aluminio reacciona fácilmente con el silicio, el elemento más abundante del planeta, formando, de esa manera, los aluminosilicatos y bauxita con el oxígeno. Así, el control geoquímico mantiene la biodisponibilidad del aluminio dentro de parámetros inofensivos. Sin embargo, las intervenciones al ambiente están aumentando su biodisponibilidad y en consecuencia, originando impactos (Gustafsson, 2001).

En cuanto a la disolución del aluminio en los suelos, esta depende principalmente del pH (la liberación del ión Al^{3+} ocurre a pH menor de 4,5). La toxicidad del aluminio es considerada el factor más importante que limita el crecimiento de las plantas. La presencia de este elemento en suelos ácidos significa la disminución de la producción agraria porque inhibe y afecta las estructuras de las raíces, haciéndolas ineficientes para la absorción del agua y de nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio. Si a estos efectos se suma el hecho de que el 40% de los suelos cultivables del planeta son ácidos (Hede, 2001), aquellas actividades humanas que aumentan la acidez de los suelos representan un factor de gran importancia ambiental y económica en el planeta (Ma, 2001).

La estructura del suelo también influye en la disponibilidad de Al^{3+} . Los agregados arcillosos impiden a los protones H^+ alcanzar los sitios de adsorción, lo que disminuye la tasa de liberación. Pero la mayor parte del Al^{3+} del suelo proviene del intercambio de aluminio unido a superficies específicas del suelo por fuerzas electrostáticas (Abreu, 2003). Otro factor que influye en la disponibilidad del Al^{3+} es la reacción química del aluminio con las sustancias orgánicas solubles e insolubles presentes en el suelo (Stevenson, 1989; Ritchie, 1995). Actualmente, el contenido de aluminio en los suelos depende en gran medida de la creciente acidificación del ambiente.

Aunque la solubilidad del aluminio en agua es muy baja, la acidificación del suelo, por efecto de las lluvias ácidas, incrementa la migración del aluminio presente en los sedimentos a los cuerpos de agua (Reuss, 1986). Así, se ha determinado que cuando este elemento alcanza aguas superficiales y subterráneas se observa una disminución de peces y anfibios, debido, entre otros efectos, a que los iones de aluminio pueden reaccionar con los fosfatos, impidiendo su disponibilidad para los organismos acuáticos. Estudios de neurotoxicidad, realizados a partir de la bioacumulación de aluminio en peces, muestran evidencias de significativo estrés oxidativo y neurotoxicidad en varias especies. (Fernandez, 2012; García, 2010).

También, los pájaros y otros animales que se alimentan de peces contaminados sufren las secuelas de su toxicidad. Muchas variedades de aves están presentando la cáscara de sus huevos más delgada y el nacimiento de polluelos de bajo peso.

La acumulación de aluminio en las plantas causa problemas de salud a los animales que las consumen, constituyendo la entrada de este elemento a las cadenas tróficas terrestres. La

presencia de altas concentraciones de aluminio en los suelos, tanto de origen natural como antropogénico, representa un factor ecológicamente significativo (Zhang, 2010).

Por otra parte, aun cuando el aluminio se libera de manera natural al aire, en forma de polvo a consecuencia de la meteorización de rocas y minerales, la actividad humana a través de las industrias del aluminio, la metalúrgica, el cemento, la actividad minera, entre otras, inyectan cantidades adicionales significativas de este elemento en el ambiente. En el aire pueden encontrarse también partículas de aluminio procedentes de plantas de energía que utilizan carbón como combustible y de incineradores. Estas partículas pueden permanecer en el aire por muchos días, mientras que las más grandes caen eventualmente a la tierra o son arrastradas por las lluvias. La respiración del aire con altas concentraciones de aluminio produce en los animales daños pulmonares y pérdida de peso, entre otros efectos (Bouchard, 2009; Driscoll, 1990; Nayak, 2002; Kumar, 2009).

Recientemente, la introducción de la nanotecnología en la industria significó un nuevo riesgo ambiental y de salud ocupacional. La exposición humana a las nanopartículas metálicas de plata, cobre, aluminio, dióxido de titanio, óxido de cinc, alúmina, nanotubos de carbono, entre otras es frecuente en las industrias automotriz, aeroespacial, de explosivos, química, electrónica, de la construcción, pinturas y textiles. Las nanopartículas artificiales, entre 20 y 120 nm, ingresan fácilmente al organismo por inhalación y se depositan en diversos tejidos y órganos, incluido el cerebro, por largos períodos de tiempo. Los efectos del impacto ambiental y sobre la salud, debidos a la liberación no intencionada de nanomateriales, están aún por ser evaluados. Hasta ahora, los experimentos con animales de laboratorio muestran que la acumulación de nanopartículas de metales inducen neurotoxicidad de acuerdo al tipo, dosis y duración de la exposición, y se asocian a alteraciones sensoriales, motoras y daños en las funciones cognitivas (Andujar, 2011; Sharma, 2012; Som, 2011).

Bioquímica de la toxicidad del aluminio y los riesgos para la salud

La amplia utilización del aluminio en la vida diaria hace fácil su exposición. El ser humano está expuesto a este metal tóxico a través de los alimentos y sus aditivos, envases, útiles de cocina, productos del hogar, agua, medicamentos y cosméticos, entre otros (Suay, 2002).

Hasta ahora no se conoce ningún papel fisiológico del aluminio dentro del organismo y de allí sus potenciales riesgos. Estudios en animales han mostrado que la exposición crónica al aluminio se asocia con cambios en el comportamiento, déficit de aprendizaje y neuropatologías, así como a daños neuroquímicos y genotóxicos (Erasí, 2011; Lima, 2011; Poirier, 2011).

La relación entre la incidencia de varias enfermedades y el aluminio es, actualmente, objeto de intensas investigaciones. La especie Al(III) es un catión con una fuerte carga y con radio iónico (0,50 Å) similar al Fe(III) (0,64 Å), Mg(II) (0,65 Å) y Ca(II) (0,99 Å). Como ellos, puede ingresar y distribuirse en el organismo mediante diferentes ligandos (Dakanali, 2003; Yokel, 2001). Estudios recientes en ratas han demostrado que los grupos citrato y glutamato permiten la absorción del aluminio en el intestino y aumentan su deposición en los glóbulos rojos, el cerebro y el riñón (Wu, 2012). Otras investigaciones en animales señalan que el tratamiento crónico con citrato de aluminio aumenta la vulnerabilidad de las células al estrés oxidativo (Nagasawa, 2006). La biodisponibilidad del aluminio en el tracto gastrointestinal también ha sido investigada en ratas, encontrándose una mayor absorción del aluminio con los ligandos orgánicos citrato, tartrato, lactato, gluconato y glutamato, que con los inorgánicos cloruro, sulfato y nitrato (Cunat, 200). Por otra parte, los iones fosfatos y el oxígeno de los grupos carboxilato, catecolatos, entre otros, presentan una alta afinidad hacia el Al(III) (Rezabel, 2007; Walton, 2012).

Se ha estimado que los efectos tóxicos ocurren cuando el aluminio compite con los iones calcio, hierro y principalmente magnesio, sustituyéndolos en las enzimas y proteínas en su sitio de unión. Así, la función de la proteína cambia y el metabolismo celular se altera, en consecuencia, afecta todo el funcionamiento del organismo (Pérez, 2002; Rezabel, 2007).

En los seres humanos, el sistema nervioso es el más susceptible a la acción del aluminio, habiéndose señalado su relación con enfermedades como el mal de Alzheimer, la encefalopatía de diálisis, cuando el paciente es expuesto a altas concentraciones de aluminio, y la demencia parkinsoniana-complejo de Guam (Guo, 2011).

La enfermedad de Alzheimer fue descrita por primera vez en 1866 por el psiquiatra alemán Alois Alzheimer. En 1992, la Organización Mundial de la Salud (OMS) la definió como “una dolencia degenerativa cerebral primaria de causa desconocida que presenta rasgos neuropatológicos y neuroquímicos característicos” (OMS, 1992). Constituye la primera causa de demencia entre la población en edades comprendidas entre los 60 y 90 años en los países más desarrollados. Su manifestación clínica presenta pérdida de la memoria y de las facultades mentales, asociadas con angustia, depresión y un deterioro generalizado que termina con la muerte. Actualmente, se cree que esta enfermedad es, posiblemente, la consecuencia de varios factores relacionados con el envejecimiento, unidos a componentes genéticos y ambientales, entre ellos la exposición al aluminio (Tomljenovic, 2011).

A nivel microscópico, los signos más característicos de la enfermedad de Alzheimer, muestran áreas del tejido cerebral, con depósitos extracelulares de un péptido, la proteína β

amiloide (A β), rodeadas de terminaciones nerviosas degeneradas y alteraciones neurofibrilares debidas a una forma fosforilada de la proteína citoesquelética tau. Allí, están presentes concentraciones anormalmente altas de Zn (II), Cu (II), Fe (III) junto con Al (III). La formación de las placas A β es el evento desencadenante de la enfermedad. Estudios recientes muestran que Al (III) y Zn (II), pero no Cu (II) ni Fe (III), inducen cambios en la conformación de la proteína, que llevan a su desestabilización en etapas tempranas (Chen y Liao, 2011; Yumoto, 2009). Hasta ahora, el diagnóstico definitivo de la enfermedad solamente se puede obtener mediante el examen del tejido cerebral en la autopsia del paciente (Yokel, 2001).

Aun cuando muchas investigaciones muestran evidencias de la relación entre el aluminio y el mal de Alzheimer, el mecanismo exacto de la toxicidad de este elemento es desconocido. Sin embargo, hay aspectos que señalan que la acumulación del metal puede potenciar los eventos oxidativos e inflamatorios que eventualmente conducen al daño del tejido cerebral (Becaria, 2002; Chopra, 2011).

Otros estudios sugieren amplias implicaciones del papel del aluminio y otros metales en las enfermedades neurodegenerativas y recomiendan evitar la exposición por largo tiempo (Campbell, 2002). Según cifras de la OMS, la población mayor de 65 años para el año 2020 podría ser de 1000 millones. Si a esto se suma el hecho de que la enfermedad se manifiesta entre el 5% al 7% de las personas mayores de 65 años, y que cerca del 50% de la población mayor de 85 años la padecen, entonces las estadísticas en un futuro cercano pueden ser preocupantes (Abbott, 2009).

En el 2006, un artículo significativo expuso nuevas evidencias acerca de la relación del aluminio con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer. La publicación mostraba los resultados del examen neuropatológico del cerebro de una mujer de 58 años, que había sufrido esta enfermedad de manera progresiva con severo deterioro cognitivo. Su cerebro presentaba evidente daño, abundantes placas de la proteína β amiloide y altas concentraciones de aluminio. Lo que llamó la atención de la comunidad científica fue el hecho de que ella era una de las 20 000 personas afectadas accidentalmente por contaminación de aluminio en Camelford, Inglaterra. En 1988, cuando ella tenía 44 años, fue expuesta por varios días a altas concentraciones de aluminio en el agua. Por error se habían vertido 20 toneladas de sulfato de aluminio en el agua potable destinada a la población. Durante varias semanas el agua de esa localidad tuvo concentraciones desde 500 a 3000 veces por encima de los valores establecidos por la legislación de la Unión Europea. Los habitantes de la localidad presentaron, durante la exposición, diversos síntomas que incluían úlceras en la piel y trastornos gástricos. Los resultados a largo plazo están aún por evaluarse en esa población (Exley y Esiri, 2006).

El aluminio en la alimentación

Se considera que las fuentes más importantes de exposición no ocupacional al aluminio son los alimentos, el agua, las bebidas, los aditivos, los envases y utensilios utilizados durante la preparación de los alimentos, con excepción de las personas que regularmente consumen medicamentos que contienen este elemento. Muchos vegetales acumulan de forma natural aluminio, y su contenido depende de la especie, las partes y la edad de la planta. Generalmente, la concentración de aluminio es alta en las hojas, las flores, los frutos y las semillas, y baja en los tallos (Anke *et al.*, 2001). Por otra parte, la fuerte evidencia de la relación entre la acumulación de aluminio y la salud hace que actualmente se replantee la adición de compuestos de este elemento a los alimentos procesados. Así, el uso de ciertos aditivos químicos con aluminio, tales como conservantes, colorantes, agentes de fermentación, antiaglutinantes, el fosfato ácido de aluminio y sodio en las harinas, entre otros, que hasta ahora se consideraban seguros, son objetados porque pueden presentar concentraciones significativamente tóxicas de aluminio (Saiyed y Yokel, 2005).

Por otro lado, en los últimos años se ha incrementado el uso de útiles de cocina, envases y ollas de aluminio, así como se ha generalizado la utilización del papel de aluminio para envolver y cocinar los alimentos. Esta es una vía de exposición que puede llegar a ser significativa si se procesan o guardan alimentos con contenido ácido, capaz de disolver parte de la superficie metálica en contacto, produciéndose la migración del metal al alimento. Algunos estudios revelan que esa exposición al aluminio puede llegar a ser significativamente mayor de los valores permitidos (Ojha, 2007).

Estudios comparativos de alimentos preparados y guardados en ollas de distintos materiales muestran diferencias importantes en cuanto a concentraciones de aluminio que ponen en riesgo a la salud. Las muestras de leche y queso procesadas en ollas de aluminio y las muestras de quesos envueltas en papel de aluminio tienen significativamente mayores cantidades de aluminio que los mismos alimentos procesados en ollas de acero inoxidable y envasados en materiales de vidrio (Ai-Ashmawy, 2011).

El aluminio en los medicamentos y cosméticos

La exposición de compuestos de aluminio en productos farmacéuticos y cosméticos es en la actualidad objeto de controversia por su asociación con los riesgos para la salud de los consumidores. El aluminio está presente en astringentes, antisépticos, analgésicos, agentes antimicrobiales, adyuvantes de vacunas, medicamentos tópicos, compuestos de materiales dentales y prótesis, entre otros. Se ha señalado que el consumo de aluminio, en personas que toman habitualmente antiácidos y analgésicos,

en formulaciones con hidróxido de aluminio, puede incluso ser mayor que el aportado por los alimentos. Se considera que la ingesta diaria de aluminio en los antiácidos y en los analgésicos de recubierta entérica puede variar desde 840 mg a 5000 mg y de 130 mg a 730 mg por día, respectivamente. Estos rangos corresponden a valores muy superiores al máximo aceptado por la OMS de 420 mg semanales para un adulto de 60 kg (Djurdjevic, 2002; World Health Organization, 2007).

Otros hallazgos relacionados con la neurotoxicidad del aluminio se han encontrado en pacientes sometidos por varios años a diálisis. En esos casos se ha observado el desarrollo de osteomalacia, calcificaciones extraesqueléticas, anemia microcítica, paro cardíaco, encefalopatías y otros severos desórdenes neurológicos de desenlace fatal. Varios estudios realizados en centros hospitalarios de Inglaterra demostraron que los pacientes eran afectados pocas veces si la concentración de aluminio en el agua utilizada para la diálisis era menor de 50 µg/L. Sin embargo, otras investigaciones encontraron que el promedio de las concentraciones de aluminio en el agua de diálisis, de los pacientes que desarrollaron encefalopatía, era de 328 µg/L, mientras que el promedio de las concentraciones de aluminio en el agua de los pacientes que presentaron múltiples fracturas óseas y otros desórdenes, fue de 160 µg/L y 80 µg/L, respectivamente. Posteriormente, cuando se realizó el tratamiento del agua para la diálisis con varios métodos de filtración que incluían carbón activado, ósmosis reversa y deionización, se constató una reducción significativa de las incidencias de las enfermedades observadas en los pacientes sometidos a diálisis por falla renal (World Health Organization, 2007).

Actualmente, se están estudiando los efectos del aluminio en las vacunas. Por más de 90 años se ha utilizado hidróxido de aluminio y fosfato de aluminio como adyuvante en las vacunas más utilizadas. Durante mucho tiempo, la seguridad de estos compuestos de aluminio ha sido ampliamente aceptada, aun cuando no se conoce exactamente su mecanismo de acción. Estudios recientes indican, notoriamente, que los adyuvantes de aluminio pueden inducir graves trastornos inmunológicos, inflamación del cerebro a largo plazo y complicaciones neurológicas asociadas con consecuencias generalizadas para la salud que hasta ahora habían sido subvaloradas (Tomljenovic, 2011).

Por otra parte, las personas también están expuestas al aluminio a través de varios tipos de cosméticos. El clorhidrato de aluminio en los desodorantes antitranspirantes forma hidróxido de aluminio insoluble en la piel que tapa los poros de las glándulas sudoríparas. Se considera que cerca de 2µg de aluminio se absorben por la piel por cada aplicación de este producto (Flarend, 2001). Recientemente, se le ha atribuido a las sales de aluminio, utilizadas como antitranspirantes, una contribución a la incidencia del cáncer de mama en las sociedades occidentales. Hasta la fecha, no hay suficientes datos epidemiológicos o experimentales que confirmen esta hipótesis. Sin embargo, y aun cuando no

se consideran mutagénicas las sales de aluminio, varias investigaciones muestran que la exposición en las axilas de estas sustancias, pueden inducir a largo plazo, procesos proliferativos en las células mamarias normales, tal como lo haría un oncógeno activado (Darbre, 2009; Sappino, 2012).

El aluminio en el agua potable

Las aguas naturales no tratadas pueden presentar cantidades significativas de aluminio, provenientes de la meteorización de las rocas y minerales, y de la acidificación de los suelos.

El sulfato de aluminio, el cloruro de aluminio y el cloruro férrico son sales frecuentemente utilizadas como agentes coagulantes, por su efectividad y bajo costo, en el tratamiento del agua, pues ayudan a reducir el color, la turbidez y el contenido de materia orgánica y de microorganismos. La eficacia de los coagulantes de aluminio y del hierro depende, principalmente, de su capacidad para formar complejos polinucleares multicargados con mejoradas características de adsorción, mediante el control del pH del sistema.

Los valores máximos permitidos de la concentración de aluminio en el agua de consumo humano son cifras que, hasta ahora, se consideran seguras. No obstante, cada vez se encuentran más indicios de la relación entre el aluminio y la aparición temprana de la enfermedad de Alzheimer en el ser humano. La OMS se ha pronunciado al respecto, concluyendo que, aun cuando son imprecisos los datos epidemiológicos entre la exposición al aluminio del agua de consumo y la enfermedad de Alzheimer, las estimaciones de esta correlación no se pueden descartar totalmente y es necesario adoptar decisiones con respecto a la necesidad de controlar la ingesta total de aluminio de todas las fuentes en la población general (OMS, 1998). De acuerdo con esta observación, resulta crítico el control riguroso del proceso de tratamiento del agua para minimizar las concentraciones de aluminio en las aguas de consumo humano.

Actualmente, la tendencia general para el tratamiento del agua es sustituir las sales inorgánicas, particularmente el sulfato de aluminio, por agentes floculantes orgánicos que sean menos tóxicos a la salud y al ambiente. Los polímeros naturales o sintéticos solubles en agua son macromoléculas que pueden usarse para mejorar la floculación. Entre los agentes coagulantes que pueden constituirse en alternativas ecológicas para el tratamiento de aguas de baja turbidez se encuentran los taninos. Esta es una práctica que data de tiempos muy antiguos, ya que los agentes floculantes naturales tienen como ventaja la ausencia de toxicidad, además de ser biodegradables. En el caso de los taninos, estos son productos naturales policíclicos, aromáticos, de alto peso molecular y ampliamente distribuidos en la naturaleza. Los taninos se encuentran en el tejido vegetal, en las hojas, en los frutos, en las raíces y en la corteza

de los árboles. Mediante sencillas transformaciones químicas, pueden convertirse en compuestos de carácter catiónico de elevado poder desestabilizador de los coloides (Lédo, 2009). La coagulación con polímeros orgánicos como agentes primarios, seguido del proceso de sedimentación, es una alternativa para el tratamiento del agua o para la reducción de las partículas coaguladas formadas cuando se usan sales de aluminio o hierro como coagulantes primarios (Sánchez, 2009). Los polímeros biodegradables son producidos naturalmente por todos los organismos vivos y representan una alternativa valiosa, ya que no tienen efectos adversos sobre la salud humana o el medio ambiente. El mecanismo de los polímeros durante el tratamiento incluye efectos electrostáticos y puentes de enlace entre las moléculas, para formar aglomerados de mayor tamaño que pueden ser removidas más fácilmente (Ozacar, 2002). Los polímeros se encuentran disponibles en varias formas y concentraciones, tales como: soluciones, polvos, emulsiones a base de agua y los polímeros floculantes del tipo Mannich (Fang, 2010).

Exposición ocupacional al aluminio

La exposición al aluminio representa un problema de salud ocupacional para las personas que trabajan en la industria de este metal cuando no se toman las precauciones adecuadas. La exposición se produce durante los procesos industriales de producción del metal y de sus productos derivados. La fiebre de los humos metálicos, una enfermedad con síntomas parecidos a la influenza, que cursa con dolor de cabeza, fiebre, escalofríos dolores en el pecho y sabor metálico, puede presentarse hasta varios días después de la exposición. Otros estudios señalan efectos adversos en las vías respiratorias de los empleados de la industria de aluminio con síntomas similares al asma, que abarcan disnea, sibilancias, fibrosis pulmonar y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Donoghue, 2011; Taiwo, 2006).

También, han sido estudiados los efectos neurológicos asociados a la exposición ocupacional del aluminio. Se ha encontrado que la exposición prolongada a este metal está significativamente relacionada con una variedad de síntomas neurológicos y psiquiátricos que incluyen pérdida de memoria, coordinación y problemas de equilibrio (Meyer-Baron, 2007). Asimismo, se ha registrado dermatitis por contacto e irritaciones en los ojos en los trabajadores expuestos al polvo de metales, entre ellos, el aluminio y sus aleaciones (Lansdown, 2011). Por otra parte, varios estudios epidemiológicos señalan un mayor riesgo de desarrollar cáncer de pulmón o cáncer de vejiga en los trabajadores de la industria del aluminio, debido, principalmente, a la exposición de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), generados durante los procesos de fundición de aluminio, en lugar de la exposición misma al metal (Friesen, 2010).

Conclusiones

La biodisponibilidad del aluminio en el ambiente está incrementándose como consecuencia de las intervenciones antropogénicas y de la progresiva acidificación de los suelos, aumentando la absorción de este elemento en las plantas y animales, así como su movilización al medio acuático.

El aluminio es un metal no esencial para los seres humanos y su neurotoxicidad ha sido demostrada, encontrándose evidencias de su relación con varias enfermedades, entre ellas la enfermedad de Alzheimer.

En el ser humano la principal exposición no ocupacional al aluminio proviene de los alimentos, aditivos, utensilios de cocina y empaques, el agua y ciertos medicamentos y cosméticos.

Las tendencias actuales para el tratamiento del agua apuntan a la sustitución de las sales inorgánicas, particularmente las de aluminio, por agentes floculantes orgánicos que sean menos tóxicos a la salud y al ambiente.

Se requiere una atención especial en la industria para minimizar los efectos de la exposición ocupacional al aluminio. La introducción de la nanotecnología en la industria, demanda profundizar las investigaciones para evaluar los riesgos ambientales y de salud ocupacional.

Referencias

- Abbott, A. (13 julio, 2011). Dementia: A Problem for our Age. *Nature*, 475 (Supp. 7355): pp. S2-S4.
- Abreu Jr., C. H., Muraoka, T. & Lavorante, A. F. (2003). Exchangeable Aluminum Evaluation in Acid Soils. *Scientia Agricola*, 60 (3), 543-548.
- Ai-Ashmawy, M. A. (April, 2011). Prevalence and Public Health Significance of Aluminum Residues in Milk and Some Dairy Products. *Journal of Food Science*, 76 (3): T73-T76.
- Andujar, P. *et al.* (Octubre, 2011). Respiratory Effects of Manufactured Nanoparticles. *Rev Mal Respir*, 28 (8), 66-75.
- Becaria, A., Campbell, A. & Bondy, SC. (August, 2002). Aluminum as a Toxicant. *Toxicology and Industrial Health*, 18 (7), 309-20.
- Bondy, S. C. (September, 2010). The Neurotoxicity of Environmental Aluminum is Still an Issue. *Neurotoxicology*, 31 (5), 575-81.

- Bouchard, M. *et al.* (2009). Repeated Measures of Validated and Novel Biomarkers of Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Individuals Living Near an Aluminum Plant in Quebec, Canada. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 72 (23), 1534-49.
- Campbell, A. (2002). The Potential Role of Aluminium in Alzheimer's Disease. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 17 Suppl 2, 17-20.
- Chen, W. T. *et al.* (March 18, 2011). Distinct Effects of Zn²⁺, Cu²⁺, Fe³⁺, and Al³⁺ on Amyloid-Beta Stability, Oligomerization, and Aggregation: Amyloid-Beta Destabilization Promotes Annular Protofibril Formation. *The Journal of Biological Chemistry*, 286 (11), 9646-56.
- Cotton, F. A. & Wilkinson, G. (1989). *Advanced Inorganic Chemistry*. New York, NY: Oxford University Press.
- Chopra, K., Misra, S. & Kuhad, A. (May, 2011). Neurobiological Aspects of Alzheimer's Disease. *Expert Opin Ther Targets*, 15 (5), 535-55.
- Cunat, L., Lanhers, M. C., Joyeux, M. & Burnel, D. (July, 2000). Bioavailability and Intestinal Absorption of Aluminium in Rats: Effects of Aluminum Compounds and some Dietary Constituents. *Biological Trace Element Research*, 76 (1), 31-55.
- Dakanali, M., Raptopoulou, C. P., Terzis, A., Lakatos, A., Banyai, I., Kiss, T. & Salifoglou, A. (January 27, 2003). A Novel Dinuclear Species in the Aqueous Distribution of Aluminum in the Presence of Citrate. *Inorganic Chemistry*, 42(2), 252-4.
- Darbre, P. D. (2009). Underarm Antiperspirants/Deodorants and Breast Cancer. *Breast Cancer Research*, 11, Suppl 3:S5
- Djordjevic, P., Jelic, R., Dzajevic, D. & Cvijovic, M. (2002). Solution Equilibria between Aluminum(III) Ion and L-Histidine or L-Tyrosine. *Metal-Based Drugs*, 8 (5), 235-248.
- Donoghue, A. M. *et al.* (March, 2011). Occupational Asthma in the Aluminum Smelters of Australia and New Zealand: 1991-2006. *American Journal of Industrial Medicine*, 54 (3), 224-231.
- Driscoll, Ch. T. & Schecher, W. D. (1990). The Chemistry of Aluminum in the Environment. *Environmental Geochemistry and Health*, 12 (1-2), 28-49.
- Erazi, H., Ahboucha, S. & Gamrani, H. (Jan. 3, 2011) Chronic Exposure to Aluminum Reduces Tyrosine Hydroxylase Expression in the Substantia Nigra and Locomotor Performance in Rats. *Neuroscience Letters*, 487 (1), 8-11.
- Exley, C. & Esiri, M. (2006). Severe Cerebral Congophilic Angiopathy Coincident with Increased Brain Aluminium in a Resident of Camelford, Cornwall, UK. *Journal of Neurology and Neurosurgery Psychiatry*, 77, 877-879.
- Fang, R., Cheng, X. & Xu, X. (October, 2010). Synthesis of Lignin-Base Cationic Flocculant and its Application In Removing Anionic Azo-Dyes from Simulated Wastewater. *Bioresource Technology*, 101 (19), 7323-7329.
- Fernández-Dávila, M. L. *et al.* (February, 2012). Aluminum-Induced Oxidative Stress and Neurotoxicity in Grass Carp (Cyprinidae-Ctenopharingodon idella). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 76 (2), 87-92.
- Flarend, R. *et al.* (February, 2001). A Preliminary Study of the Dermal Absorption of Aluminium From Antiperspirants Using Aluminium-26. *Food and Chemical Toxicology*, 39 (2), 163-168.
- Friesen, M. C. *et al.* (October 1, 2010). Chronic and Acute Effects of Coal Tar Pitch Exposure and Cardiopulmonary Mortality Among Aluminum Smelter Workers. *American Journal of Epidemiology*, 172 (7), 790-799.
- García-Medina, S. *et al.* (2010). Aluminium-Induced Oxidative Stress in Lymphocytes of Common Carp (Cyprinus Carpio). *Fish Physiology and Biochemistry*, 36, 875-888.
- Guo, C. H. & Wang, C. L. (Nov. 2011). Plasma Aluminum is a Risk Factor for Oxidative Stress and Inflammation Status in Hemodialysis Patients. *Clinical Biochemistry*, 44 (16), 1309-1314.
- Gustafsoon, J. P. *et al.* (2001). Aluminium Solubility Mechanisms in Moderately Acid Bs Horizons of Podzolized Soils. *European Journal of Soil Science*, 52, 655-665.
- Hede A. R., Skovmand B., López-Cesati J. (2001). Acid Soils and Aluminum Toxicity. In M. P. Reynolds, J. J. Ortiz-Monasterio & A. McNab (Eds.), *Application of Physiology in Wheat Breeding* (pp. 172-182). México, D. F.: International Maize and Wheat Improvement Center CIMMYT.

- Hind, A. R., Bhargava, S. K. & Crocott, S. C. (1999). The Surface Chemistry of Bayer Process Solids: A Review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 146, 359-374.
- Krewski, D. *et al.* (2007). Human Health Risk Assessment for Aluminium, Aluminium Oxide, and Aluminium Hydroxide. *Journal of Toxicology and Environmental Health B Crit Rev.* 10(Suppl 1), 1-269.
- Kumar, V. & Gill, K. D. (November, 2009). Aluminium Neurotoxicity: Neurobehavioural and Oxidative Aspects. *Archives of Toxicology*, 83 (11), 965-978.
- Lansdown, AB. (2011). Metal Ions Affecting the Skin and Eyes. *Metal Ions in Life Science*, 8, 187-246.
- Lédo, P., Lima, R., Paulo, J. & Duarte, M. (2009). Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de *moringa oleifera* para la depuración de aguas con baja turbiedad. *Información Tecnológica*, 20 (5), 3-12.
- Lewis, T. E. (1989). *Environmental Chemistry and Toxicology of Aluminium*. Michigan: Lewis Publishers.
- Lima, P. D. *et al.* (October, 2011). Genotoxic Effects of Aluminium, Iron and Manganese in Human Cells and Experimental Systems: A Review of the Literature. *Human and Experimental Toxicology*, 30 (10), 1435-1444.
- Ma, J. F., Ryan, P. R. & Delhaize, E. (June, 2001). Aluminium Tolerance in Plants and the Complexing Role of Organic Acids. *Trends in Plant Science*, 6 (6), 273-278.
- Martchek, K. (2006). Modelling More Sustainable Aluminium. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (1), 34-37.
- Meyer-Baron, M. *et al.* (November, 2007). Occupational Aluminium Exposure: Evidence in Support of its Neurobehavioral Impact. *Neurotoxicology*, 28 (6), 1068-1078.
- Nagasawa, K., Akagi, J., Koma, M., Kakuda, T., Nagai, K., Shimohama, S. & Fujimoto, S. (May 30, 2006). Transport and Toxic Mechanism for Aluminum Citrate in Human Neuroblastoma SH-SY5Y Cells. *Life Science*, 79 (1), 89-97.
- Nayak, P. (June, 2002). Aluminum: Impacts and Disease. *Environmental Research*, 89 (2), 101-115.
- Ojha, P., Ojha, C. S. & Sharma, V. P. (Jan., 2007) Influence of Physico-Chemical Factors on Leaching of Chemical Additives from Aluminium Foils Used for Packaging of Food Materials. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 49 (1), 62-66.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1992). *Décima revisión de la clasificación internacional de las enfermedades. Trastornos mentales y del comportamiento. Descripciones clínicas y pautas para el diagnóstico*. Madrid, España: Meditor.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1998). Aluminium in Drinking-Water. Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Recuperado de: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/en/aluminium.pdf
- Ozacar, M. & Ayhan, I. (2002). The Use of Tannins from Turkish Acorns (Valonia) in Water Treatment as a Coagulant and Coagulant Aid. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26, 255-263.
- Pérez, G., Vittori, D., Garbossa, G. & Nesse, A. (2002). Toxicidad del aluminio sobre el sistema eritropoyético: mecanismos involucrados / Aluminum toxicity in erythropoiesis: related mechanisms. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 36 (1), 41-50.
- Poirier, J. *et al.* (October 13, 2011). Double-Blind, Vehicle-Controlled Randomized Twelve-Month Neurodevelopmental Toxicity Study of Common Aluminum Salts in the Rat. *Neuroscience*, 193, 338-362.
- Prabhakar, P. V. *et al.* (December 7, 2011). Oxidative Stress Induced by Aluminum Oxide Nanomaterials after Acute Oral Treatment in Wistar Rats. *Journal of Applied Toxicology*, 1099-1263.
- Reuss, J. O. & Johnson, D. W. (1986). Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters (Vol. Ecological Studies Series no. 59). Springer-Verlag: New York.
- Rezabal, E., Mercero J. M., Lopez, X. & Ugalde, J.M. (October 8, 2007). Protein Side Chains Facilitate Mg/Al Exchange in Model Protein Binding Sites. *Chemphyschem*, 8 (14), 2119-2124.
- Rezabal, E., Mercero, J. M., Lopez, X. & Ugalde, J. M. (September, 2007). A Theoretical Study of the Principles Regulating The Specificity for Al(III) against Mg(II) in Protein Cavities. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 101 (9), 1192-1200.

- Ritchie, G. S. (1995). Soluble Aluminium in Acidic Soils: Principles and Practicalities. *Plant and Soil*, 171, 17-27.
- Saiyed, S. M. & Yokel, R. A. (March, 2005). Aluminium Content of some Foods and Food Products in the USA, with Aluminium Food Additives. *Food Additives Contaminants*, 22 (3), 234-244.
- Sánchez-Martín, J., González-Velasco, M. & Beltrán-Heredia, J. (2009). *Acacia mearnsii* de Wild Tannin-Based Flocculant in Surface Water Treatment. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 29 (2), 119-135.
- Sappino, A. P. *et al.* (March, 2012). Aluminium Chloride Promotes Anchorage-Independent Growth in Human Mammary. *Journal of Applied Toxicology*, 32 (3), 233-243.
- Sharma, H. S. *et al.* (Jan. 10, 2012). Neurotoxicity of Engineered Nanoparticles from Metals. *CNS Neurol Disord Drug Targets*. 11 (1), 65-80.
- Som, C. *et al.* (August, 2011). Environmental and health effects of nanomaterials in nanotextiles and façade coatings. *Environ Int*, 37 (6), 1131-1142.
- Soon, Y. K. (1993). Fractionation of Extractable Aluminum in Acid Soils: A Review and a Proposed Procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24, 1683-1708.
- Stevenson, F. J. & Vance, G. F. (1989). Naturally Occuring Aluminum-Organic Complexes. *The Environmental Chemistry of Aluminum*, 1, 117-145.
- Suay, L. *et al.* (Noviembre-diciembre, 2002). Revisión de los estudios sobre la exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. *Revista Española de Salud Pública*, 76 (6), 645-658.
- Taiwo, O. A. *et al.* (March, 2006). Incidence of Asthma Among Aluminum Workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 48 (3), 275-282.
- Tomljenovic, L. (2011). Aluminum and Alzheimer's Disease: After a Century of Controversy, Is There a Plausible Link? *Journal of Alzheimer's Disease*, 23 (4), 567-598.
- Tomljenovic, L. & Shaw, C. A. (2011). Aluminum Vaccine Adjuvants: Are they Safe? *Current Medicinal Chemistry*, 18, 2630-2637.
- Totten, G. E. & MacKenzie, D. E. (2003). *Handbook of Aluminum: Alloy Production and Materials Manufacturing* (Vol. 2). New York, USA: CRC Press.
- Walton, J. R. (2012). Aluminum Disruption of Calcium Homeostasis and Signal Transduction Resembles Change that Occurs in Aging and Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's Disease*, 28, 1-19.
- World Health Organization (WHO). (2007). Safety Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants (WHO/FOOD Additives Series: 58. Sixty). Ginebra, Suiza: World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Wu, X., Li, J, Hu, J. N. & Deng, Z.Y. (2012). The Effects of Glutamate and Citrate on Absorption and Distribution of Aluminum in Rats (publicación electrónica antes de la impresión). *Biological Trace Element Research*, 148 (1), 83-90.
- Yokel, R. A. & McNamara, P. J. (April, 2001). Aluminium Toxicokinetics: An Updated Minireview. *Pharmacology and Toxicology*. 88 (4), 159-167.
- Yumoto, S., Kakimi, S., Ohsaki, A. & Ishikawa, A. (November, 2009). Demonstration of Aluminum in Amyloid Fibers in the Cores of Senile Plaques in the Brains of Patients with Alzheimer's Disease. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 103 (11), 1579-1584.
- Zhang, B., Wang, X., Li, X., Ni, Y. & Li, H. (2010). Aluminium Uptake and Disease Resistance in Nicotiana Rustica Leaves. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 655-663.