

Adsorbentes y Materiales Utilizados para Filtración y Reducción de Contaminantes en Aguas Potables

Adsorbents and Materials Used for Filtering and Reducing Water Pollutants in Drinking

Ingrid Gisela Ramirez Pedraza¹, Efren de Jesús Muñoz²

¹ Grupo de Investigación Ingenium Civilibus, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Juan de Castellanos Tunja, Boyacá, Colombia.
ingridgiserami@hotmail.com

² Grupo Desarrollo y Aplicación de Nuevos Materiales (DANUM), Facultad de Ciencias Básicas/Escuela de Química / Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia.
efren17@gmail.com

Recibido / Received: 27-06-2016 – Aceptado / Accepted: 19-09-2016

Resumen

El desarrollo de métodos novedosos en la purificación para calidad de agua, es una de las ramas de la ciencia de los materiales que buscan soluciones en la actualidad, debido a la contaminación presente en los recursos hídricos naturales; el fin es buscar nuevas alternativas que permitan la adsorción de moléculas, filtración de partículas en suspensión, resinas de intercambio y nanotecnología, entre otros. El desarrollo de esta revisión pretende dar a conocer diferentes materiales utilizados, así como nuevas tecnologías aplicadas para esta rama. A partir del estudio de los diferentes tratamientos de filtración, se quiere llegar a la purificación por medio de un costo bajo y con eficiencias de 100 %, con materiales naturales, que no requieren procesos de síntesis.

Palabras clave: filtros, calidad de agua, adsorbentes naturales, adsorbentes sintéticos.

Abstract

The development of novel methods for the purification of water quality, is a of the branches of materials science seeking solutions today, because this pollution in natural water resources, is to look for new alternatives to molecules adsorption, filtration of suspended particles, and nano-exchange resins, among others. The development of this review aims to meet different materials used as well as new technologies applied to this field. From the study of the different treatments of filtration, purification wants to reach through a low cost and efficiencies of 100 % natural materials that do not require synthesis processes.

Keywords: filters, water quality, natural absorbent, synthetic adsorbents.

I. INTRODUCCIÓN

Los adsorbentes naturales son cada vez más utilizados en procesos de purificación de agua debido a su fácil acceso en la naturaleza, de bajo costo en comparación con materiales sintéticos, con propiedades notables de adsorción, intercambio iónico y filtración, y también debido al hecho de que los métodos son eficientes y se desarrollan para regular la estructura geométrica y la naturaleza química de su superficie [1]. De los pasos más importantes en la purificación de agua, son la eliminación de impurezas dispersas y la eliminación de sustancias disueltas en forma de moléculas e iones. En este estudio, se resumen los principales materiales utilizados en la filtración para reducción de contaminantes en el agua.

II. ADSORBENTES NATURALES

Los principales adsorbentes naturales que se distinguen según las características estructurales, su composición química, porosidad y propiedades fisicoquímicas, se encuentran: sílice, silicatos por capas, aluminosilicatos (zeolitas).

A. Sílice: estos son los materiales de origen sedimentario constituidos en un 60 a 95 % de SiO_2 amorfo. Se distinguen tres tipos de roca silíceas: diatomitas, tripolies y arcillas de sílice. Se diferencian entre sí en origen y las características fisicoquímicas. Diatomita, a veces todavía llamado tierra de diatomeas o tierra de infusorios, es de origen fitogénica, se compone de residuos fosilizados de organismos unicelulares más simples (conchas de algas diatomeas). En 1 cm^3 , el número de diatomita varía de 2 a 30 millones, dependiendo en particular del depósito [2].

B. Silicatos por capas: con respecto a las características de la estructura porosa, se pueden dividir en tres tipos [3]: silicatos estratificados con expansión estructural de células (montmorillonita, hectrita, saponita, vermiculita), silicatos estratificados con estructura celular rígida (caolinita, glauconita, pirofilita, talco) y silicatos de capa (paligorskita y sepiolita).

C. Aluminosilicatos (zeolitas): las zeolitas naturales se han conocido durante mucho tiempo [4]. Más de 40 tipos ya han sido descubiertos, pero hasta 1960 los investigadores trataron en práctica con muestras de zeolitas de origen volcánico que se encuentran en pequeñas cantidades y, por lo tanto, carece de interés desde el punto de vista de la utilización práctica. Sin embargo, cuando se descubrieron grandes depósitos sedimentarios de zeolitas naturales a finales de 1960 y principios de 1970 en varias regiones del mundo, las zeolitas han sido de interés para los ingenieros debido a su adsorción única, intercambio iónico, filtración y propiedades catalíticas, su facilidad de la explotación de canteras y bajo costo.

D. Otros adsorbentes naturales: otros adsorbentes naturales utilizados en la práctica de la purificación de aguas residuales, son: perlita, asbestos, bauxita y magnesita.

E. Perlita: es un tipo especial de roca volcánica vítrea que contiene SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O y otros. [5], [6], [7].

La perlita es utilizada en una variedad de procesos y productos industriales como iluminación aislador. Es un aluminosilicato natural con estructura extremadamente porosa.

F. Asbesto: entre los materiales dispersos naturales, los asbestos comienzan a adquirir cada vez mayor valor. Esta especie se puede subdividir en dos grupos: anfibólica y crisotilo, que difiere en composición, estructura y propiedades. Los recursos mundiales del anfibólica están limitados y no puede satisfacer las necesidades en constante aumento de la industria. En la actualidad, la producción de amianto anfibólica constituye solo el 5-10 % total de las fibras de asbesto, y los esfuerzos de los científicos se concentran en el desarrollo de la tecnología para la preparación de los anfíboles sintéticos [9], [10]. El costo y la escasez relativamente alto de los anfíboles, obstaculiza su uso en los procesos de purificación de agua.

Se ha demostrado [11] que, a pesar de la textura fibrosa de crisotilo (fórmula química $4\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_{10}$), su

estructura es similar a la de la caolinita. Con respecto a las propiedades de adsorción, el crisotilo debe considerarse como un subgrupo individual de silicatos estratificados.

La superficie externa de amianto crisotilo varía de 4 a 60 m²/g [22-24], y depende del grado de dispersión, canales tubulares de crisotilo se llenan en una medida significativa con material amorfo o partículas minerales. Según los cálculos de [11], solo el 12-15 % del volumen de poros internos están libres de crisotilo. Las moléculas de agua, amoníaco y otras sustancias, se adsorben en el espacio no ocupado de los poros.

G. Bauxita: es un material heterogéneo natural compuesto, principalmente, de uno o más minerales de óxidos de aluminio y otros componentes que incluyen óxidos de hierro, sílice, titanio, aluminosilicatos, zirconio y agua [12].

H. Magnesita: existen diversos estudios referentes a la adsorción de componentes iónicos y no iónicos. A continuación, se presentan algunos de los estudios que han sido realizados en todo el mundo para la reducción de contaminantes del agua como partículas en suspensión, metales pesados, virus e intercambio iónico.

III. ADSORBENTES SINTÉTICOS

La adsorción de compuestos sobre carbón activo o sobre adsorbentes carbonáceos sintéticos, es una tecnología cara, aunque una vez saturados pueden de nuevo regenerarse mediante diversos métodos (tratamiento con vapor, calentamiento, uso de disolventes, etc.). En el caso de adsorbentes sintéticos, se pueden fabricar superficies con determinadas características (por ejemplo, superficies hidrofóbicas o hidrofílicas) en función de lo que queramos descontaminar. Una superficie hidrofóbica resulta especialmente indicada en el caso de compuestos organoclorados o en el proceso de extracción por vapor en un suelo, ya que adsorben menos cantidad de agua e interfiere menos en el proceso de oxidación catalítica posterior.

IV. REVISIÓN MATERIALES UTILIZADOS COMO FILTROS

A nivel mundial, diferentes grupos de investigación dan particular atención a las propiedades de las zeolitas debido a sus propiedades. Las zeolitas naturales son actualmente explotadas en diferentes partes del mundo y presentan más de 100 usos reportados en agricultura, industria, descontaminación ambiental, materiales de construcción, medicina y veterinaria, productos para el hogar o refrigeración solar. Las zeolitas, debido a su alta capacidad de intercambio de cationes, así como propiedades de tamices moleculares, han sido ampliamente utilizadas como adsorbentes en los procesos de separación y purificación en las últimas décadas [13]. La eliminación de contaminantes en el agua requiere tecnologías rentables, en procesos de química verde y, en la actualidad, una variedad de técnicas se han desarrollado.

Dentro de las aplicaciones de las zeolitas, se tienen diferentes estructuras, observando lo ventajoso que es su uso en la adsorción de contaminantes en aguas. En las aguas residuales de una mina de cobre abandonada en Nevada se utilizó clinoptilolita para tratar agua residual multion, con el fin de eliminar aluminio (Al), Fe (III), Cu (II), y Zn, observándose que algunos iones estaban por debajo de los estándares de agua potable, pero Mn (II) y Ni (II) no [6], [14].

En el trabajo de [15], se evalúa el potencial de utilización de la zeolita natural con un bajo costo de intercambio iónico y alta adsorción en el control de la contaminación y la recuperación de los metales. La aplicación de las zeolitas naturales en el control de la contaminación industrial, está adquiriendo importancia y el nivel de esfuerzo técnico es cada vez más en expansión. Además, presenta propiedades y características de rendimiento, que harán avanzar la aplicación práctica de la tecnología de las zeolitas naturales.

El comportamiento de adsorción de zeolitas naturales (clinoptilolita) con respecto a Co²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ y

Mn^{2+} se ha estudiado por [16] con el fin de considerar su aplicación en aguas residuales contaminados. Se encontró que los fenómenos de adsorción dependen de la densidad de carga y el diámetro de iones hidratados. De acuerdo con los estudios de equilibrio, la secuencia de selectividad se puede dar como $Co^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$. Estos resultados muestran que las zeolitas naturales tienen un gran potencial para eliminar las especies de metales pesados catiónicos de las aguas residuales industrial [16].

Las zeolitas en plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala, no emplean la técnica de intercambio de iones de amonio y pocas aplicaciones se han desarrollado para recuperar el nitrógeno amoniacal, por ejemplo, para fines agrícolas. Las zeolitas además de dar intercambio de iones y adsorción amoniacal, tienen como objetivo utilizarlas para la recuperación de nitrógeno [17].

En un estudio de Roman-Seda *et al.* de filtros de zeolita, fue evaluada la actividad de una planta de tratamiento con el fin de determinar el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos, remoción de disolventes orgánicos y oxígeno disuelto. Dentro de los resultados encontrados, se reportó la eliminación de sólidos orgánicos igualmente teniendo en cuenta la tasa de flujo de los analitos, entre otros [18]. Cabe resaltar que la estructura y propiedades físicas de zeolita natural, densidad aparente baja, capacidades de adsorción, la hacen ideal para su uso en procesos de purificación de aguas residuales y biológicas [19].

La mezcla de diferentes materiales adsorbentes da como resultado una amplia adsorción de contaminantes, como en el caso de Salem *et al.* El cual utiliza tratamiento térmico y calcinación en la estabilidad de un lecho filtrante; se investigó el comportamiento de la mezcla de zeolita comercial, bentonita y caolín debido a sus habilidades en la eliminación de iones de metales pesados, por medio de diferentes cantidades de polvos mezclados conforme al algoritmo de diseño de mezcla y moldeadas por extrusión en forma de anillo Raschig. En la investigación, se llegó a la conclusión de que la capacidad de adsorción se puede optimizar simultáneamente por la adición de 66.67, 29.17 y 4.16 % de zeolita, ben-

tonita y caolín, respectivamente. Posteriormente, se evaluó la cinética de la isoterma de adsorción de plomo en la composición seleccionada y segundo orden mostró la precisión aceptable en la predicción de los datos de adsorción. La posibilidad de inmovilización de plomo por los anillos fabricados puede ser útil en la práctica industrial [20].

La rectorita, otro tipo de arcillas, muestra propiedades interesantes en el desarrollo de filtros [21]. Los resultados evidencian que las muestras exhiben relativamente alta resistencia, bajo coeficiente de expansión térmica y los poros gradiente bien distribuidos debido a las excelentes propiedades del material de rectorita arcilla (es decir, buena aglutinante, gran índice de plasticidad, bajo secado y contracción de cocción, de alta refractariedad y buena resistencia al choque térmico, combinación y distribución).

La sinterización es un tratamiento térmico de un polvo compactado metálico o cerámico; [22] prepararon un material a base de zeolita, bentonita, carbón activado y Caolionita, con el fin de realizar un lecho filtrante para calidad de agua. En este estudio, se tuvo en cuenta la preparación del material en diferentes proporciones de masa, este material fue sinterizado a una temperatura de 1.000 °C; en este estudio, se destaca el comportamiento del carbón activado con respecto a la porosidad. Los resultados muestran que los materiales a partir de las mezclas de 85 % de zeolita, 8 % de bentonita, caolinita 6 -6,5 %, y 0,5 a 1 % de carbón, tienen un tamaño de poro uniforme de 0,3 μm demostrando excelentes rendimientos de filtración.

Las propiedades de la sílice como adsorbentes, al igual que las zeolitas, tienen un amplio espectro en ciencia de materiales; [23] evaluaron dos filtros biológicos a escala piloto que utilizan arena de manganeso y arena de sílice, respectivamente. Se probaron para la eliminación de hierro y manganeso de un pozo de agua en Harbin. Hierro y bacterias oxidantes de manganeso se aislaron y se usaron como inóculos para el filtro.

El análisis indicó que la cinética de eliminación de hierro, en función del caudal, siguió la reacción de primer orden. Se demostró que un filtro de arena

de manganeso tuvo mayor eficiencia de remoción de un filtro de arena de sílice. Nuevos materiales de diseño basados en sílice ketoenol-piridina fueron fabricados para la eliminación cuantitativa de Zinc [24], los parámetros de adsorción mostraron que el material presenta nuevas mejoras y tiene la mayor capacidad y mayor selectividad para la adsorción eficaz de Zn (II).

Materiales carbonosos con diferentes estructuras porosas, se han sintetizado por la carbonización de los precursores de almidón/sílice a diferentes temperaturas [25] observando estructuras meso y microporosas con uso en medios filtrantes; la tecnología de sinterización para la preparación de materiales porosos a partir de sedimentos en el mar, ha sido desarrollado para su uso en la purificación del agua. Los productos sinterizados a 400 °C mostraron que eran adsorbentes muy eficaces para la eliminación de metales pesados [25], por tal motivo se ha seguido investigado este método en la formación de filtros con poros pequeños que faciliten la eliminación de contaminantes en el agua.

En cuanto a resinas de intercambio de iones, son capaces de eliminar muchos iones inorgánicos del agua potable, incluyendo el hierro y el manganeso, y la formación de óxidos de metales insolubles. [26] analizaron diferentes parámetros fisicoquímicos para evaluar la efectividad de una membrana de ultrafiltración de acetato de celulosa como diferentes opciones de tratamiento de agua, principalmente en lo relacionado con la calidad microbiológica y diferentes iones de carácter fisicoquímico donde se evalúan principales cantidades de hierro y de manganeso. Como resultados, los niveles de eliminación de la eficiencia se han mejorado con la adición de cloro, ya que crea óxidos metálicos de hierro y manganeso, creadas por cloración, podrían servir como adsorbentes.

Respecto a dureza y a sulfatos [27], un estudio reciente implica el uso de Mg/Al en nanolaminas de doble hidróxido, y se encontró que los valores de eficiencia de remoción corresponden a ser el 65,1 % y 69,2 % para la dureza y sulfato, respectivamente. Además, iones de dureza se pueden eliminar con resinas de intercambio catiónico, aunque típicamente

usando un reactor de lecho fijo en el extremo de un tren de tratamiento. En el estudio de [28], se investigó la viabilidad de la combinación de aniones y tratamiento de intercambio catiónico en un único reactor de mezcla completa para el tratamiento de agua cruda. Se logró mediante el tratamiento combinado de intercambio iónico 70 % como carbono orgánico disuelto y la dureza > 55 % como dureza total.

Para la eliminación de metales, se han llevado a cabo tratamientos diferentes; uno de ellos, es el intercambio iónico; ácido iminodiacético se han introducido en perlas poliméricas de estireno-divinilbenceno. Esta resina se evaluó para la eliminación de iones de metales pesados Cd(II), Cr(VI), Ni(II) y Pb(II) a partir de sus soluciones acuosas. Los resultados mostraron una mayor afinidad de la resina hacia el Cr(VI) para el que la eliminación obtenida fue 99,7 % en condiciones óptimas siguiendo el orden Ni (II) > Pb (II) > Cd (II) con 65 %, 59 % y 28 % de eliminación [29]. En otro estudio, por medio del cual el rendimiento de un compuesto membrana de película de tipo espiral delgada en proceso de ósmosis inversa se estudia para rechazar la Cu² y Ni²; los resultados obtenidos indican que Na₂ EDTA puede aumentar el tamaño de iones de quelato de Cu² y Ni² y, por lo tanto, su eficiente rechazo en el proceso de eliminación por la membrana utilizada.

Recientemente, las tecnologías de filtración se han convertido en una estrategia de uso frecuente en el tratamiento del agua potable, ya que se pueden controlar pequeños microorganismos patógenos, como los virus de manera muy eficaz. Para estos procesos, se usan membranas de ultrafiltración como una opción atractiva para la solución de las problemáticas que generan los virus y quistes de protozoos, así el manejo de los subproductos de desinfección como resultados se observan una totalidad de filtración de virus por medio de membranas de millipore polisulfona [30].

[31] Estos autores exploran la combinación de membranas de tela tejida con nanopartículas de plata, mostrando que al utilizar este material para filtración presentan un alto potencial de desinfección e hidrofiliidad, lo que mejora la permeabilidad de la membrana optimizando las condiciones de

calidad del agua, el color blanco original de estas membranas cambió a marrón debido a la resonancia de plasmón de superficie de la plata, se muestran rendimientos de 100 % para eliminación de *E. Coli*. [32] en su trabajo relacionado con la remoción de color y dureza en muestras de agua para el consumo, utiliza nanomembranas como nuevas tecnologías competitivas para el tratamiento de aguas. Estas membranas se clasifican como membranas de nanofiltración de ultra baja presión, proporcionando una disminución entre el 90-95 % trihalometanos, 85 a 95 % de dureza y más del 70 % iones monovalentes cuando se opera en un rango de 70 a 100 psi de presión de conducción.

Se han desarrollado filtros de agua bactericidas por medio de filtros de membrana de nitrocelulosa, los cuales se impregnaron de diferentes nanopartículas de plata biosintetizada. Se utilizaron las nanopartículas de plata (AGNPS) de *Aspergillus niger* (AGNPS-Asp), *Cryptococcus laurentii* (AGNPS-Cry) y *Rhodotorula glutinis* (AGNPS-Rho) para la impregnación. Las propiedades bactericidas de estas nanopartículas contra *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* y *Pseudomonas aeruginosa*, se demostraron con éxito. El efecto antimicrobiano más alto se observó para AGNPS-Rho. En este estudio, se observó una inhibición completa del crecimiento bacteriano en filtros de membrana de nitrocelulosa impregnados con 1 mgL^{-1} de AGNPS biosintetizada. Esta concentración fue capaz de reducir el recuento de colonias de bacterias por más de 5 órdenes de magnitud, haciendo adecuado para un dispositivo de purificación de agua [33].

[34] Evaluaron dos filtros de tamaño de 0,35 micras y 0,45 micras con el fin de remover hierro y manganeso en el agua subterránea proveniente del Volcán Etna ubicado en Sicilia, que se utiliza para el propósito de abastecimiento potable para la población, estas aguas contienen concentraciones elevadas de metales (vanadio, hierro y manganeso) de acuerdo con los límites de contaminantes establecidos por la normativa Europea. La eliminación del manganeso fue significativa (95 %) por adición de polielectrolitos a pH 8,5, con una dosis estequiométrica de 0,5 de oxidante y el filtro de malla final de 35 micras.

Otros iones metálicos que han eliminado de las aguas residuales, son el Arsénico (As); [35] el envenenamiento por As de las aguas subterráneas ha causado una crisis de salud devastador en Bangladesh y Bengala Occidental (India). Una alta concentración de hierro (Fe) también está presente en el agua subterránea de esta región. Este estudio investigó el rendimiento de eliminación de Fe y As por medio de un filtro comercial de arcilla y salvado de arroz. y propusieron una modificación con el fin de mejorar la eficiencia de eliminación mediante la introducción red de hierro y bacterias oxidantes de hierro. Los datos de campo sugirieron que el filtro es muy eficaz en la eliminación de Fe a través de proceso de oxidación y co-precipitación. El arsénico también se retiró. Una modificación simple de este filtro usando red de hierro y las bacterias oxidantes de hierro, aumentó sustancialmente 18 % más como remoción.

En cuanto a filtros microporosos, [36] destacan la eficiencia de un filtro de cerámica microporosa de alúmina-silicato de litio elaborado mediante un proceso tradicional y aplicado en el continente de África. Este filtro está equipado con un tubo de silicona, una bolsa plegable que actúa como contenedor y protección para el filtro. El producto ha probado el uso de agua inoculada con altas concentraciones de diferentes bacterias, así como con agua corriente contaminada a nivel local. El filtro es muy eficaz con el 99,99 % de eficiencia de reducción de bacterias y sólidos suspendidos en agua natural.

Diferentes tipos de filtros se evalúan para saber el mejor rendimiento, Mwabi *et al.* prepararon dispositivos de tratamiento de cuatro filtros dentro de los cuales se encontraron: filtro bioarena, filtro de cubo, filtro de vela de cerámica y el filtro de recipiente poroso impregnado con plata. El desempeño de los cuatro filtros, se evaluó en términos de velocidad de flujo, en lo relacionado con los contaminantes físico-químicos (turbidez, fluoruros, fosfatos, clorofila a, magnesio, calcio y nitratos) y contaminantes microbianos (como *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhimurium*, *Shigella dysenteriae*). El fluoruro fue la sustancia retirada de manera eficiente (99,9 %) y la eficiencia de eliminación más pobre magnesio (26-56 %). Un mayor rendimiento en la

eliminación de contaminantes químicos, se observó con el filtro de cubo. El porcentaje de remoción de bacterias osciló entre un 97 % y un 100 % [37].

Caolinita es otro de los materiales utilizados en la filtración. Por medio del estudio de la cinética de adsorción de metal mediante caolinita y el intercambio de iones H^+ , es posible observar diferencias en la retención de Pb, Zn y Cd. La cantidad de Pb que es retenido en 0,1h, es generalmente menor que la cantidad de Zn o Cd retenidos, mostrando que Pb inicialmente puede moverse más lentamente para ser adsorbido por la caolinita. Adsorción de Cd también parece ser más susceptible a cambios en el pH [38], [39].

Se estudió el efecto de la composición química de los caolines egipcios sobre el desempeño de las zeolitas a base de caolín de bajo costo en la eliminación Pb^{2+} [40]. Los diferentes caolines egipcios recogidos de Santa Catalina, Kalabsha y Dehessa (KS, KK y KD, respectivamente) fueron utilizados en la preparación de los correspondientes zeolitas Na-Y (ZS, ZK y ZD). Se llegó a la conclusión de que el proceso de carga consiste en la competencia entre los tres procesos: (a) la precipitación de algunos Pb^{2+} en forma de hidróxidos, (b) el intercambio de iones y (c) quimisorción de Pb^{2+} en superficies de zeolita. Durante los procesos de carga Pb^{2+} , la cantidad equivalente de carga Pb^{2+} es siempre mayor que la de la Na^+ liberado, lo que sugiere el predominio del mecanismo de quimisorción.

El carbón activado representa mejoras en la adsorción de sustancias orgánicas, estudios demuestran la efectividad de estos filtros [41], por lo tanto, se utiliza como un refuerzo de adsorbentes, tales como el estudio de [42] en el cual se prepara una mezcla carbono activado y $CaO-Al_2O_3-SiO_2(CAS)$ a partir de papel de desperdicios y de combustible de plástico (RPF), por carbonización y activación con vapor. Las muestras formadas por activación química utilizando K_2CO_3 , mostraron una alta superficie específica, pero un contenido de cenizas inferior debido al lavado después de la activación. Por el contrario, las muestras preparadas por la activación con vapor física mostraron superficie bastante inferior, debido a su contenido de cenizas superior. Las

muestras activadas físicamente mostraron mucho más altas propiedades de absorción de Ni^{2+} (un metal pesado representante) e iones fosfato (un representante de un oxianión perjudiciales) que las muestras activadas químicamente, debido al mayor contenido de amorfa CAS en las antiguas muestras. Tela de carbón activado con electrodos capaces de eliminar cationes divalentes como Mg y Ca de aguas residuales con efectividad alta [43] son estudiados para aplicaciones de ablandamiento del agua, se necesitaba tener un tamaño de poro adecuado y la estructura con mesoporos altamente accesibles y microporos ramificados.

Durante la última década, la nanofiltración (NF) hizo un gran avance en la producción de agua potable para la eliminación de contaminantes. La combinación de nuevas normas para la calidad del agua potable y la mejora constante del proceso de nanofiltración ha dado lugar a nuevas ideas, las posibles aplicaciones y nuevos proyectos en escala de laboratorio, a escala piloto y escala industrial. Este documento ofrece una visión general de las aplicaciones en la industria del agua potable, que ya se han realizado o que se sugieren en la base de la investigación a escala de laboratorio.

Las aplicaciones pueden ser encontradas en el tratamiento de las aguas superficiales, así como las aguas subterráneas. La posibilidad de utilizar NF para la eliminación de la dureza, la materia orgánica natural, microcontaminantes, tales como pesticidas y compuestos orgánicos volátiles, virus y bacterias, salinidad, nitratos y arsénico. Algunas de estas aplicaciones han demostrado ser fiable y pueden ser consideradas como técnicas conocidas; otras aplicaciones todavía son estudiadas a escala de laboratorio.

El modelado es difícil debido a los efectos de enuciamiento y la interacción entre los diferentes componentes [44], [45], [46]. En una fuente de agua subterránea muy coloreada en el Condado de Orange, California del Sur, se llevaron 8 membranas capaces de eliminar el color de las aguas subterráneas. Las membranas producen un nivel de color de 3 unidades de color o menos, muy por debajo del estándar actual de agua potable de 15 unidades

de color, trihalometanos se eliminaron [47]. En el sur de África se trabajaron 3 filtros en 3 zonas diferentes con el fin de ver las variables del filtro por zona [48], denotando como resultados principales que la cantidad de retención de sales depende de la concentración de la misma en la zona, demostrando alta retención en sales como CaCO_3 .

Las empresas de agua, especialmente las más pequeñas, están teniendo cada vez más dificultades que demuestren aumento de las necesidades de tratamiento requeridos; en los Estados Unidos, para la eliminación de contaminantes químicos y microbianos en el agua potable [49]. La reducción de las concentraciones de nitratos se ha estudiado por NF [50], los resultados de este estudio demuestran que el tratamiento de las aguas subterráneas con nanofiltración permite producir agua potable con calidad excepcional a un costo operativo que no sea excesiva; se obtuvo un rechazo para nitratos de 76 %.

V. CONCLUSIONES

Como se puede observar, a partir del estudio de los diferentes tratamientos de filtración, se quiere llegar a la purificación por medio de un costo bajo y con eficiencias de 100 %, para esto, los materiales óptimos son los naturales, ya que no requieren procesos de síntesis; además, se pretende generar la remoción de las sustancias contaminantes a escala nano que ofrecen técnicas como la nanofiltración o la estandarización de poros nanométricos por medio de diferentes procesos fisicoquímicos.

En el caso de los sistemas de filtración, se han obtenido rendimientos del 99 % para la eliminación de contaminantes químicos, como materia orgánica causante de la turbidez, magnesio, calcio y nitratos; así como metales de hierro, vanadio y manganeso. Se presenta la opción de utilizar nanofibras para la eliminación de compuestos orgánicos, microcontaminantes, tales como pesticidas y compuestos orgánicos volátiles, virus y bacterias, nitratos y arsénico.

REFERENCIAS

- [1] Y. I. Tarasevich, "Application of natural adsorbents and adsorption-active materials based thereon in the processes of water purification", *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 120, Part B, A. Dąbrowski, Ed., ed: Elsevier, 1999, pp. 659-722.
- [2] V. G. e. Berezkin, V. P. Pakhomov and K. I. Sakodynskiĭ, *Solid supports in gas chromatography*: Supelco, 1980.
- [3] Y. I. Tarasevich and F. Ovcharenko, "Adsorption sur des minéraux argileux," *Institut Français du Pétrole, Rueil Malmaison*, 1980.
- [4] R. M. Barrer, *Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves*: Academic Press, 1978.
- [5] Y. Shavisi, S. Sharifnia, S.N. Hosseini, M.A. Khadivi, *J. Ind. and Eng. Chem.* 20 (2014) 278.
- [6] M. Nasrollahzadeh, S.M. Sajadi, A. Rostami-Vartooni, M. Bagherzadeh, R. Safari, *J. Mol. Catal. A Chem.* 400 (2015)
- [7] T.K. Erdem, C. Meral, M. Tokyay, T.Y. Erdogan, *Cem. Concr. Comp.* 29 (2007)
- [8] S. Wang and Y. Peng, "Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment", *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, pp. 11-24, 2010.
- [9] L.F. Grigor'eva, T.A. Makarova, E.N. Korotkova and O.G. Chigareva, *Synthetic Amphibolic Asbestos*, Nauka, Leningrad, 1975 (in Russian).
- [10] D.V. Kalinin, N.D. Deniskina and G.G. Lokhova, *Amphibolic Asbestos, Its Synthesis and Origin in Nature*, Nauka, Novosibirsk, 1975 (in Russian).

- [11] W.A. Deer, R.A. Howie and J. Zussman, *Rock-Forming Minerals*, vol. 3: Sheet Silicates, Longmans, London, 1962.
- [12] Gow, N.N., Lozej, G.P., 1993. Bauxite, *Geosci. Can.* 20 (1), 9e16.
- [13] S. Wang and Y. Peng, “Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, pp. 11-24, 2010.
- [14] M. Zamzow, B. Eichbaum, K. Sandgren, and D. Shanks, “Removal of heavy metals and other cations from wastewater using zeolites”, *Separation Science and Technology*, vol. 25, pp. 1555-1569, 1990.
- [15] S. Kesraoui-Ouki, C. R. Cheeseman and R. Perry, “Natural zeolite utilisation in pollution control: A review of applications to metals’ effluents,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 59, pp. 121-126, 1994.
- [16] E. Erdem, N. Karapinar and R. Donat, “The removal of heavy metal cations by natural zeolites,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 280, pp. 309-314, 2004.
- [17] A. Hedström, “Ion exchange of ammonium in zeolites: A literature review,” *Journal of Environmental Engineering*, vol. 127, pp. 673-681, 2001.
- [18] R. A. Roman-Seda, “ FIELD STUDIES AND MATHEMATICAL MODELLING OF BIOLOGICALLY ACTIVE SAND FILTERS”, 1981, 326 p.
- [19] M. Park and S. Komarneni, “Occlusion of KNO₃ and NH₄NO₃ in natural zeolites”, *Zeolites*, vol. 18, pp. 171-175, 1997.
- [20] A. Salem and R. Akbari Sene, “Removal of lead from solution by combination of natural zeolite–kaolin–bentonite as a new low-cost adsorbent,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 174, pp. 619-628, 2011.
- [21] F. Zhang, C.-X. Qi, S. Wang, J.-h. Liu and H. Cao, “A study on preparation of cordierite gradient pores porous ceramics from rectorite,” *Solid State Sciences*, vol. 13, pp. 929-933, 2011.
- [22] S. Mopoung, N. Sriprang and J. Namahoot, “Sintered filter materials with controlled porosity for water purification prepared from mixtures with optimal ratio of zeolite, bentonite, kaolinite, and charcoal,” *Applied Clay Science*, vol. 88-89, pp. 123-128, 2014.
- [23] S. Qin, F. Ma, P. Huang, and J. Yang, “Fe (II) and Mn (II) removal from drilled well water: A case study from a biological treatment unit in Harbin,” *Desalination*, vol. 245, pp. 183-193, 2009.
- [24] S. Radi, S. Tighadouini, M. Bacquet, S. Degoutin, B. Revel, and M. Zaghrioui, “Quantitative removal of Zn(II) from aqueous solution and natural water using new silica-immobilized ketoenol–pyridine receptor”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 3, pp. 1769-1778, 2015.
- [25] Y. Qiao and X. Zhao, “Electrorheological effect of carbonaceous materials with hierarchical porous structures,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 340, pp. 33-39, 2009.
- [26] K.-H. Choo, H. Lee, and S.-J. Choi, “Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with pre-chlorination for drinking water treatment,” *Journal of Membrane Science*, vol. 267, pp. 18-26, 2005.
- [27] M. N. Sepehr, K. Yetilmezsoy, S. Marofi, M. Zarrabi, H. R. Ghaffari, M. Fingas, and M. Foroughi, “Synthesis of nanosheet lay-

- ered double hydroxides at lower pH: Optimization of hardness and sulfate removal from drinking water samples”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 45, pp. 2786-2800, 2014.
- [28] J. N. Apell and T. H. Boyer, “Combined ion exchange treatment for removal of dissolved organic matter and hardness”, *Water Research*, vol. 44, pp. 2419-2430, 2010.
- [29] R. K. Misra, S. K. Jain and P. K. Khatri, “Iminodiacetic acid functionalized cation exchange resin for adsorptive removal of Cr(VI), Cd(II), Ni(II) and Pb(II) from their aqueous solutions”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 185, pp. 1508-1512, 2011.
- [30] S. S. Madaeni, A. G. Fane and G. S. Grohmann, “Virus removal from water and wastewater using membranes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 102, pp. 65-75, 1995.
- [31] C. A. Mecha and V. L. Pillay, “Development and evaluation of woven fabric microfiltration membranes impregnated with silver nanoparticles for potable water treatment”, *Journal of Membrane Science*, vol. 458, pp. 149-156, 2014.
- [32] B. M. H. Watson, C.D., “Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies,” *Desalination*, vol. 72, pp. 11-22, 1989/4//.
- [33] J. G. Fernández, C. A. Almeida, M. A. Fernández-Baldo, E. Felici, J. Raba and M. I. Sanz, “Development of nitrocellulose membrane filters impregnated with different biosynthesized silver nanoparticles applied to water purification”, *Talanta*, vol. 146, pp. 237-243, 2016.
- [34] P. Roccaro, C. Barone, G. Mancini and F. G. A. Vagliasindi, “Removal of manganese from water supplies intended for human consumption: a case study”, *Desalination*, vol. 210, pp. 205-214, 2007.
- [35] M. Shafiquzzaman, M. S. Azam, J. Nakajima and Q. H. Bari, “Investigation of arsenic removal performance by a simple iron removal ceramic filter in rural households of Bangladesh”, *Desalination*, vol. 265, pp. 60-66, 2011.
- [36] J. J. B. Simonis, A.K., “Manufacturing a low-cost ceramic water filter and filter system for the elimination of common pathogenic bacteria”, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 50-52, pp. 269-276, PY - 2012///.
- [37] J. K. Mwabi, F. E. Adeyemo, T. O. Mahlangu, B. B. Mamba, B. M. Brouckaert, C. D. Swartz, G. Offringa, L. Mpenyana-Monyatsi and M. N. B. Momba, “Household water treatment systems: A solution to the production of safe drinking water by the low-income communities of Southern Africa”, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 36, pp. 1120-1128, 2011.
- [38] J. C. Miranda-Trevino and C. A. Coles, “Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH”, *Applied Clay Science*, vol. 23, pp. 133-139, 2003.
- [39] J. Chen, A. Anandarajah and H. Inyang, “Pore fluid properties and compressibility of kaolinite”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, pp. 798-807, 2000.
- [40] D. M. El-Mekkawi and M. M. Selim, “Removal of Pb²⁺ from water by using Na-Y zeolites prepared from Egyptian kaolins collected from different sources”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, pp. 723-730, 2014.
- [41] N. H. Phan, S. Rio, C. Faur, L. Le Coq, P. Le Cloirec and T. H. Nguyen, “Production of fibrous activated carbons from natural

- cellulose (jute, coconut) fibers for water treatment applications”, *Carbon*, vol. 44, pp. 2569-2577, 2006.
- [42] Z. Kadirova, Y. Kameshima, A. Nakajima and K. Okada, “Preparation and sorption properties of porous materials from refuse paper and plastic fuel (RPF)”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, pp. 352-358, 2006.
- [43] S.-J. Seo, H. Jeon, J. K. Lee, G.-Y. Kim, D. Park, H. Nojima, J. Lee and S.-H. Moon, “Investigation on removal of hardness ions by capacitive deionization (CDI) for water softening applications”, *Water Research*, vol. 44, pp. 2267-2275, 2010.
- [44] B. Van der Bruggen and C. Vandecasteele, “Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry”, *Environmental Pollution*, vol. 122, pp. 435-445, 2003.
- [45] W. J. Conlon and S. A. McClellan, “Membrane softening: a treatment process comes of age”, *Journal of the American Water Works Association*, vol. 81, pp. 47-51, 1989.
- [46] P. Eriksson, “NANOFILTRATION EXTENDS THE RANGE OF MEMBRANE FILTRATION”, *Environmental Progress*, vol. 7, pp. 58-62, 1988.
- [47] L. Tan and R. G. Sudak, “Removing color from a groundwater source”, *Journal (American Water Works Association)*, pp. 79-87, 1992.
- [48] F. E. Duran and G. W. Dunkelberger, “A comparison of membrane softening on three South Florida groundwaters”, *Desalination*, vol. 102, pp. 27-34, 1995.
- [49] M. Yahya, C. Cluff and C. Gerba, “Virus removal by slow sand filtration and nanofiltration”, *Water Science & Technology*, vol. 27, pp. 445-448, 1993.
- [50] B. Van der Bruggen, K. Everaert, D. Wilms and C. Vandecasteele, “Application of nanofiltration for removal of pesticides, nitrate and hardness from ground water: rejection properties and economic evaluation”, *Journal of Membrane Science*, vol. 193, pp. 239-248, 2001.