



Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reuso del agua

Research, technology development and
innovation for water saving and recycling

*María Yolanda Reyes-Vidal**

*Ángel Aceves Díez***

*Alicia Martínez-Silva**

*Ali Asaff **

Fecha de recepción: noviembre de 2011

Fecha de aceptación: abril de 2012

* Coordinación de Ciencia de los Alimentos, CIAD

** Laboratorios Minkab

Dirección para correspondencia:

asaff@ciad.mx (Ali Asaff)

Resumen / Abstract

A nivel mundial, la sobreexplotación de los recursos hídricos está conduciendo a su agotamiento por lo que urge se implementen políticas adecuadas en la gestión del agua. Es necesario impulsar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación (I&DT+i), como pilares de la economía del conocimiento en la generación de nuevas herramientas para la obtención, suministro, tratamiento y reuso del agua.

En este trabajo presentamos una revisión de la problemática mundial y nacional, así como dos casos de estudio en los que hemos participado activamente. El primer caso muestra el desarrollo de una cadena de valor de los efluentes de la industria del nixtamal, la masa y la tortilla, donde el agua tratada recuperada del proceso propuesto es considerada como un producto. En el segundo caso, se presenta el desarrollo de un proceso para el pretratamiento de las aguas residuales de una industria procesadora de carne de cerdo. A través de estos casos, se expone nuestra visión holística del problema, que ha permitido el desarrollo de proyectos innovadores, con interacción clave entre los actores para convertir ideas en procesos/productos o servicios para el mercado.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, sistema de innovación, nejayote.

Worldwide, over-exploitation of water resources is leading to their exhaustion. Therefore, it is necessary to foster research, technology development and innovation as the basis for a knowledge-based economy to create new tools to obtain, supply, treat and recycle water.

In this work we present a general overview of the national and world situations, as well as two case studies in which our research group has been actively participating. The first case study shows the development of a value chain starting with the corn flour industry waste water, where the water recovered after processing is the outcome. The second study shows the development of a new process for pre-treatment of waste water in a meat industry. Through these cases, it is exposed our holistic vision of the problem, which has allowed the development of innovative projects with a key interactions among players to create new ideas in process/product or services for the market.

Key words: waste water treatment, innovation system, nejayote.

Introducción

El agua, más que un recurso limitado, es el elemento central de la vida de cualquier especie en el planeta. Si bien, 75% de la superficie de nuestro planeta es agua, solamente el 2% de este volumen es aprovechable. La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km^3 de los cuales el 97.5% es agua salada y solo el 2.5% es dulce. De esta cantidad, casi el 70% no se halla disponible para el consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (Clarke y King, 2004). Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, una pequeña porción se encuentra en lagos y ríos, mientras que la mayor parte se localiza en los acuíferos, que son estratos o formaciones geológicas permeables que permiten la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros o grietas.

En el siglo *xx*, mientras la población mundial se triplicó, las extracciones de agua se sextuplicaron, provocando un grado de presión muy alto sobre los recursos hídricos a nivel mundial. El aumento de la población en el mundo genera problemas sociales y económicos relacionados con el incremento de la demanda de agua, ya que precisamente se establecen en zonas donde los acuíferos son bajos o nulos y se limita la disponibilidad del líquido, además de que la reserva se reduce a pasos agigantados a una tasa de $6 \text{ km}^3/\text{año}$ (INEGI, 2007).

México ocupa el octavo lugar en la lista de países con mayor extracción de agua, después de la India, China, Estados Unidos, Pakistán, Irán, Japón e Indonesia (Conagua, 2011). A nivel nacional se extraen $80.6 \text{ km}^3/\text{año}$ de agua; se destina el 76.7% a uso agrícola, el 9.20% al uso industrial y el 14.1% para el abastecimiento público (Conagua, 2011); es la desigualdad en la distribución regional del agua disponible en México uno de los factores que dificulta su aprovechamiento sustentable. Por ejemplo, en el norte del país, la disponibilidad de agua por habitante alcanza niveles de escasez críticos, mientras que en el cen-



tro y en el sur es abundante. A nivel nacional, entre los años 2000 y 2005, la disponibilidad por habitante disminuyó de 4,841 m³/año a 4,573 m³/año, y los escenarios estudiados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), así como las proyecciones de población llevadas a cabo por el Consejo Nacional de Población (Conapo) indican que para el año 2030, la disponibilidad media del agua por habitante se reducirá a 3,705 m³/año.

Con lo anterior queda claro que México no escapa a un problema de importancia mundial como es el manejo inadecuado de los recursos hídricos, lo que ha generado diversos problemas, que van desde aquellos en la salud, como son enfermedades por la falta de agua potable o uso de agua contaminada, hasta la imposibilidad de garantizar el abasto a futuro por el agotamiento de los mantos.

Ante la gran dificultad que representa la gestión del agua de manera integral, considerando factores económicos, sociales, políticos, fisicoquímicos y biológicos, la tendencia mundial en años recientes ha sido un manejo integrado desde un enfoque holístico, que incluye el tratamiento de aguas residuales y su reutilización. Con este propósito, diversos gobiernos han venido estableciendo su discusión como una estrategia en pro del medio ambiente, la sustentabilidad y la viabilidad de conservación del agua. Los esfuerzos por crear una cultura del cuidado y reuso del agua han tenido dos vertientes principales. La primera se refiere a la vertiente social, en la cual los trabajos se han enfocado a los aspectos antropológicos y sociales de su utilización, principalmente para la irrigación (Tortajada, 2002). Por otro lado, la vertiente epidemiológica se ha preocupado esencialmente por los posibles efectos negativos sobre la salud (Cifuentes et ál., 2002). En ambas líneas de investigación confluye la preocupación por los efectos del uso de aguas residuales en actividades agrícolas, en muchas ocasiones, como resultado de la escasez del preciado líquido en zonas áridas y semiáridas.

En México, pese a que la política del agua es compleja y multifacética, se observa una desarticulación entre la política ambiental y la política hidráulica (Tortajada, 2002; Caire, 2004; Pacheco-Vega, 2005), pese a que existen planes del gobierno federal para unificar esfuerzos en el cuidado del agua y su reuso. El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 (PND) tiene como premisa el desarrollo humano sustentable y como finalidad establecer los objetivos nacionales, las estrategias y las prioridades para que en la presente administración se consiga avanzar hacia el logro de la visión de un país próspero en los próximos años. Específicamente, en el eje rector 4 del PND, se establece que a través de la sustentabilidad ambiental se realice una administración eficiente y racional de los recursos naturales, de una manera tal que sea posible mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras. Uno de los principales retos que enfrenta México es incluir al medio ambiente como uno de los elementos de competitividad y del desarrollo económico y social, ya que solo así se puede alcanzar un desarrollo sustentable. Desafortunadamente, los esfuerzos de conservación de los recursos naturales y ecosistemas suelen verse obstaculizados por un círculo vicioso que incluye pobreza, agotamiento de los recursos naturales, deterioro ambiental y, por consiguiente, más pobreza.



En el caso del agua, es necesario atender aspectos de protección de las aguas superficiales y de los mantos acuíferos, ya que su disponibilidad por habitante se está reduciendo debido a factores demográficos y climáticos. Muchos de los cuerpos de agua presentan altos niveles de contaminación, haciéndolos inadecuados para el consumo humano. Por lo anterior, se debe atender la calidad de los cuerpos de agua, ya que su contaminación contribuye al deterioro ambiental. Es impostergable incrementar la eficiencia de la utilización del agua en la agricultura, ya que se trata del principal uso del recurso y su eficiencia promedio es de únicamente 46%. De esta manera, una de las estrategias del PND establece que se debe incentivar una cultura del agua que privilegie su ahorro y su uso racional en el ámbito doméstico, industrial y agrícola. Se vigilarán también los mecanismos necesarios para hacer cumplir las obligaciones fiscales y administrativas asociadas al uso del agua.

En el esquema del Sistema Nacional de Planeación Democrática se estableció el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 (PNH), que incorpora ocho objetivos, 65 estrategias y 115 metas, así como los indicadores correspondientes y a las organizaciones e instituciones que tienen mayor relevancia para el logro de cada objetivo. Uno de los objetivos principales del PNH es tratar y reutilizar las aguas residuales. En años recientes, el porcentaje de las aguas residuales colectadas que se tratan ha aumentado del 23 al 36%, y la meta es elevar este valor al 60% en el 2012, para alcanzar el 100% de las aguas residuales municipales en el 2020 y el 100% de las aguas residuales industriales en el 2025 (Conagua, 2010).

El mundo se enfrenta a diversos problemas ambientales graves, sin embargo, sin negar la importancia de los estrictos retos que estos representan, todos ellos tienden a acarrear consecuencias socioeconómicas graves que no siempre aparecen en los debates públicos y políticos. Por consiguiente, en Europa se han subrayado cuatro retos principales que necesitan ser abordados en las próximas dos décadas y que se supone serán mitigados por las tecnologías ambientales: el cambio global, el agotamiento de los recursos, vivir en un ambiente sano y mejorar la competitividad y el crecimiento (Sanz y Villar, 2005). En el tema concreto del agua, es evidente que se necesitan generar diversas herramientas en materia de infraestructura para su suministro, así como para el tratamiento de las aguas residuales. Es imprescindible invertir en la investigación, desarrollo e innovación (I&D&i) para hacer un mejor uso del agua, que van desde plantas desaladoras, tecnologías avanzadas para riego, sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como su reutilización.

Tratamiento de efluentes industriales

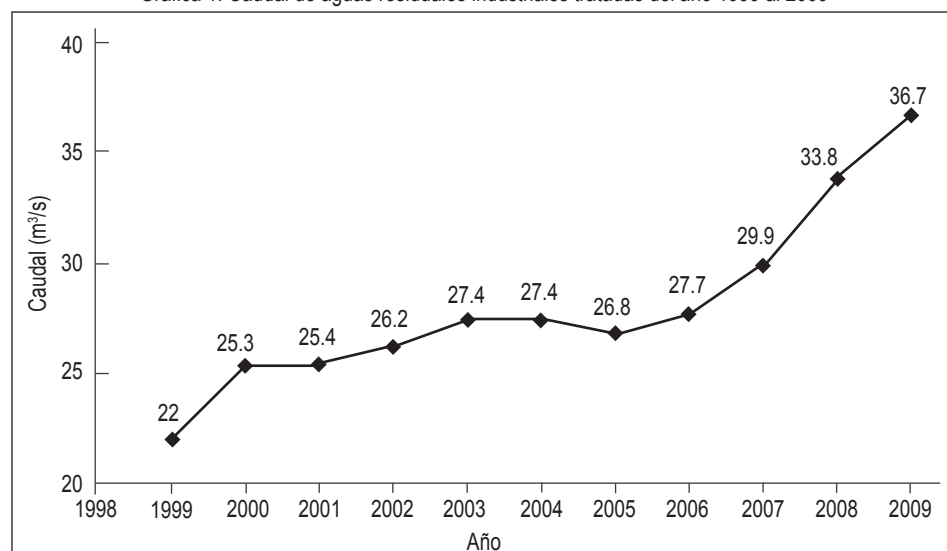
De acuerdo con los principios establecidos por la Agenda 21 en la Cumbre Mundial sobre la Tierra, en Río de Janeiro (serie de principios para lograr el desarrollo sustentable que hace referencia a la aplicación del "principio de precaución") es preferible evitar la contaminación que controlarla. El principio "el que

contamina, paga”, establece que la responsabilidad de los agentes generadores de contaminación es internalizar el costo de limpiarla o eliminarla (internalizar la externalidad) (World Commission on Environment and Development, 1987). A pesar de que este principio tiene más de veinte años de vigencia, en la mayor parte de los casos sigue sin llevarse a la práctica.

La industria es uno de los principales motores de crecimiento y desarrollo económico. Alrededor del 20% del agua se emplea en la industria, lo cual equivale al consumo de 130 m³/persona/año. De esta cantidad, más de la mitad se utiliza en las centrales termoeléctricas dentro de sus procesos de enfriamiento. Entre los mayores consumidores de agua bajo este rubro se encuentran las plantas petroleras, las industrias metálicas, papeleras, maderas, de procesamiento de alimentos y la industria manufacturera. En México, en cuestión de aguas residuales industriales, se estima que en el año 2008 se generaron 178 m³/s, de los cuales únicamente se trataron 15% en cerca de 1,800 plantas de tratamiento, mientras que los 151 m³/s restantes fueron descargados a cuerpos receptores sin ningún tratamiento. Al 2009, se estima que se trataron 19.3% de las aguas residuales generadas, tanto municipales como industriales. En el caso de aguas residuales industriales, aproximadamente, 2,186 plantas en operación a nivel nacional trataron 36.7 m³/s de aguas residuales (gráfica 1). Es de destacar que en dicha gráfica se observa que el tratamiento de efluentes industriales del año 2005 a la fecha tiene un crecimiento acelerado (Conagua, 2011).

La meta del tratamiento de aguas debe ser buscar reducir los contaminantes a niveles más seguros de exposición, donde el agua pueda ser reciclada para el

Gráfica 1. Caudal de aguas residuales industriales tratadas del año 1999 al 2009



Fuente: adaptado de Conagua, 2011.



riego o usos industriales. Al momento de elegir la tecnología apropiada de tratamiento, debe considerarse cierto número de factores, incluyendo la cantidad, naturaleza y composición de la corriente de residuos, los estándares del efluente, opciones de pretratamiento industrial y factibilidad de funcionamiento, que incluye el análisis de los factores económicos y técnicos.

De acuerdo con la experiencia de trabajo de nuestro grupo de investigación con empresas, se ha observado que cada vez son más las interesadas en resolver el problema de la descarga de sus aguas residuales, debido a diversos factores. En primer lugar, destaca la presión de las políticas gubernamentales sobre la obligatoriedad del tratamiento de efluentes industriales, acompañadas también de incentivos para la construcción de plantas de tratamiento y para la reutilización de las aguas tratadas. El incumplimiento de las normativas ambientales implica el pago de multas muy fuertes que están en proporción directa con la cantidad de contaminantes que son vertidos. El panorama es crucial para la competitividad de las empresas y pone en riesgo inclusive la continuidad de sus operaciones. Por otro lado, se encuentra la exigencia cada vez mayor por parte de los clientes en materia de cuidado ambiental (ISO 14000), así como el racionamiento en la provisión de agua o el agotamiento de los acuíferos. En el primer caso, el compromiso con el cuidado del medio ambiente brinda la oportunidad a las empresas de establecerse como ESR, "Empresas Socialmente Responsables". Esta denominación puede definirse como la contribución activa y voluntaria al mejoramiento social, económico y ambiental por parte de las empresas, generalmente con el objetivo de mejorar su situación competitiva y valorativa. En el segundo caso, ya se empieza a visualizar el agua como un elemento estratégico para la continuidad de las operaciones industriales, haciendo de su cuidado una necesidad.

Se ha observado, sin embargo, que uno de los grandes problemas en el manejo de aguas residuales industriales es que las compañías que se dedican a su tratamiento, buscan aplicar casi siempre técnicas convencionales, sin considerar las particularidades de cada efluente. Por ejemplo, cuando se emplean reactores biológicos se usan consorcios microbianos importados o desarrollados en condiciones y medios particulares, pero que colapsan bajo las condiciones climáticas en las que deben de operar los sistemas o con los contaminantes a los que son expuestos. Tampoco se considera la posibilidad de recuperar subproductos que algunos efluentes suelen contener y que, al margen de disminuir su carácter contaminante, brinda también la oportunidad de disminuir el costo de los tratamientos gracias a su valor de mercado. Estos aspectos se traducen en el hecho de que los tratamientos aplicados sean poco efectivos, por lo que se debe optar por operaciones o procesos mucho más costosos lo que hace que, por lo menos en México, sea inviable su aplicación a nivel industrial. Lo anterior deja un gran vacío tecnológico, ya que las empresas se ven imposibilitadas de contar con alternativas para el tratamiento de sus efluentes que sean factibles, tanto técnica, como económicamente.



Las tecnologías e innovaciones ambientales han cambiado en términos de enfoque básico durante los últimos años. Si se realiza una revisión de la evolución histórica de los intentos en remediar los impactos ambientales del comportamiento humano y de las tecnologías, en particular, se pueden distinguir, sin duda alguna, tres fases principales (Sanz y Villar, 2005):

- Tecnologías "al final del proceso" u optimizaciones de sistema (entre la década de los años setenta y la de los ochenta).
- Tecnologías de procesos integrados o rediseño de sistemas (entre la década de los años ochenta y la de los noventa).
- Innovaciones de sistema o funcionales (entre finales de los años noventa y la actualidad).

El concepto del sistema de innovación destaca que el flujo de tecnología e información entre personas, empresas e instituciones es clave para un proceso innovador. Contiene la interacción entre los actores que se necesitan para convertir una idea en un proceso, producto o servicio en el mercado. En este contexto, nuestro laboratorio participa a través de una red de innovación conformada por laboratorios de otros centros de investigación, universidades y empresas, en proyectos de investigación y desarrollos tecnológicos específicos para algunas industrias en particular. En los proyectos se persigue, tanto el tratamiento efectivo de los efluentes, ya sea para la descarga del efluente reducido en sus contaminantes o la posibilidad de obtener agua de reuso, como la recuperación de productos residuales de alto valor que suelen contener dichos efluentes. A continuación se dan algunos ejemplos del trabajo que se viene desarrollando.

Caso nacional: el tratamiento del nejayote

La nixtamalización es un proceso ancestral que consiste en cocer los granos de maíz en agua alcalina. Los granos cocidos luego son molidos y el producto, conocido como masa, es empleado para la elaboración de la tortilla, alimento básico de la dieta de los mexicanos y cuyo uso se ha venido extendiendo por todo el orbe. En una modalidad industrial, la masa es secada y molida para su expendio como harina de maíz nixtamalizado. En cualquier caso, el agua del cocimiento alcalino se conoce como nejayote y es un efluente rico en materia orgánica que contiene altas concentraciones de sólidos suspendidos y en solución (aproximadamente 2% de sólidos totales) (Rosentrater, 2006). En la actualidad se eliminan entre 16 y 22 millones de m³/año de nejayote, 40% de los cuales corresponden a las grandes empresas productoras. El nejayote es considerado un desecho altamente contaminante debido a su carga inorgánica y orgánica elevada que genera demandas bioquímicas de oxígeno del orden de 7,000 a 10,000 mg O₂/L, mientras que las normativas ambientales (NOM-001-SEMARNAT-1996; NOM-002-ECOL 1996) señalan un límite máximo de descarga de 200 mg O₂/L.



La problemática ambiental que genera el nejayote ha sido muy difícil de solucionar debido a su naturaleza altamente compleja y a la inexistencia o a la insuficiencia de los métodos actuales de tratamiento de aguas residuales convencionales. El tratamiento inadecuado de este tipo de aguas conlleva, inevitablemente, al deterioro de los cuerpos de agua.

Entre los factores que dificultan el tratamiento del nejayote se encuentra la gran cantidad de material en suspensión que no logra ser eliminado por procesos unitarios como la sedimentación, centrifugación o filtración (Ramírez-Romero et ál., 2011). Además, la presencia de compuestos fenólicos inhibidores del crecimiento microbiano, el pH y contenido de calcio elevados dificultan su tratamiento. Desde hace más de treinta años se han probado sin éxito plantas compactas para el tratamiento de aguas residuales, así como sistemas tradicionales de tratamiento biológico como lodos activados, reactores empacados aerobios y anaerobios y reactores biológicos rotatorios; es este último el más eficaz para remover algunos contaminantes industriales tóxicos o recalcitrantes (Hartmann y Durán de Bazúa, 1981; Hartmann y Durán de Bazúa, 1981b; Durán de Bazúa, 1983; Civit et ál., 1984; González-Martínez, 1984).

En el mejor de los casos se han instalado lagunas de oxidación en los lugares donde las industrias nixtamaleras disponen del espacio suficiente y se encuentran bastante alejadas de centros urbanos debido a las molestias de los malos olores que generan. Por lo anterior, resulta urgente desarrollar nuevas tecnologías y alternativas que permitan enfrentar dicha problemática, además que la existencia de una legislación medioambiental cada vez más exigente (NOM-002-ECOL1996) que demanda empresas ambientalmente sostenibles, pone en serio riesgo la actividad de las empresas del rubro.

Dado que el proceso de nixtamalización usa una gran cantidad de agua y los inconvenientes que ocasiona el tratamiento del nejayote, la mayor parte de los esfuerzos se ha centrado en generar tecnologías alternas a la nixtamalización tradicional, en las que se trata de reducir drásticamente la producción de efluentes con altos contenidos de materia orgánica y consumo de agua (Wilkinson y Short, 1998; Sánchez y de la Cámara, 2004; Figueroa et ál., 2006; Bejarano et ál., 2009). Se ha propuesto y evaluado reutilizar el agua de nejayote para remover el maíz de las tinas, lo que se traduce en un ahorro de agua potable. Por otro lado, los sólidos suspendidos que se obtienen en la sedimentación pueden ser reutilizados en la molienda, sustituyendo el agua que se agrega en el molino, lo que resulta en un mayor rendimiento de la masa (Ramírez-Romero et ál., 2011). Sin embargo, los parámetros característicos de los efluentes para su descarga continúan muy por encima de la norma. También se ha propuesto la reutilización del nejayote para la nixtamalización, luego de la eliminación parcial de los sólidos en suspensión (Viniestra-González y Ramírez-Romero, 2007); aunque, a decir de algunas empresas del sector, el producto resultante no es aceptado por el consumidor final debido a que presenta sabores y aromas indeseables que se generan por los compuestos fenólicos presentes en el nejayote.



Actualmente, nuestro grupo de trabajo, que involucra a investigadores del CIAD, CIATEJ y Laboratorios Minkab, empresa dedicada al desarrollo de aplicaciones biotecnológicas innovadoras, viene desarrollando una serie de procesos con el objetivo de tratar de manera eficiente el nejayote. La tecnología que se está generando no pretende solamente el tratamiento y reuso del agua, sino también busca recuperar y aprovechar los compuestos en dicho efluente. A la fecha, se está escalando a nivel industrial, una tecnología patentada (Asaff et ál., 2008) para la remoción de compuestos fenólicos de alto valor presentes en el nejayote. También se han venido desarrollando procesos biotecnológicos para transformar dichos compuestos fenólicos en vainillina (Asaff et ál., 2011), el saborizante de mayor consumo a nivel mundial o, más recientemente, en ésteres con aplicación en la industria cosmética (Proyecto Conacyt No. 157003).

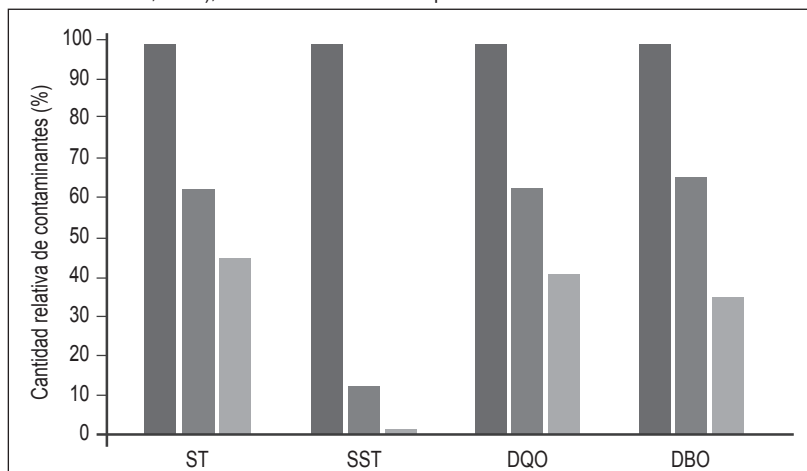
Por otro lado, se ha logrado desarrollar a nivel de laboratorio un proceso novedoso y efectivo que permite la remoción total de los sólidos suspendidos en el nejayote y que actualmente se encuentra en proceso de validación a nivel piloto. Existen trabajos relativos a procesos que se han desarrollado con este propósito (González-Martínez, 1984; Viniegra-González y Ramírez-Romero, 2007; Ramírez-Romero et ál., 2011), pero en ninguno de ellos se observa una remoción del 100% (gráfica 2). La importancia de una remoción total de los sólidos en suspensión radica en el hecho de que únicamente bajo esas circunstancias es posible aplicar tecnologías de membranas, las cuales son de las pocas opciones que permitirían el reuso del agua en la nixtamalización al tratarse de un proceso para la producción de alimentos. Se ha observado que al pasar el nejayote libre de sólidos en suspensión, a través de membranas, el 80% del influente logra atravesarla y el producto resultante (permeado) es agua con un bajo contenido de material en solución que puede ser reutilizada nuevamente en el proceso de nixtamalización (gráfica 3).

El restante 20% del influente conforma la fracción líquida de rechazo con un contenido de sólidos en solución entre cuatro y cinco veces mayor al contenido del influente. Los sólidos en solución contenidos se forman mayormente por carbohidratos fermentables que pueden ser empleados como sustrato para diferentes procesos biotecnológicos, por ejemplo, para la producción de bioetanol de segunda generación (Proyecto Conacyt No. 153341). Gracias a las características de novedad, inventiva y potencial de aplicación industrial de los procesos que se vienen desarrollando se están solicitando las patentes correspondientes.

El desarrollo de tecnología para el tratamiento del nejayote por nuestro grupo de trabajo tiene un enfoque holístico que propone la creación de una cadena de valor de los efluentes del nixtamal (Asaff, 2010), donde el agua es considerada uno de los productos de dicha cadena. A través de los procesos desarrollados es posible también recuperar o purificar otros componentes, como ácidos fenólicos y carbohidratos fermentables, que son los principales causantes de las elevadas demandas químicas o bioquímicas del nejayote. Esos productos pueden ser comercializados o empleados en la producción de biocombustibles. Así, el

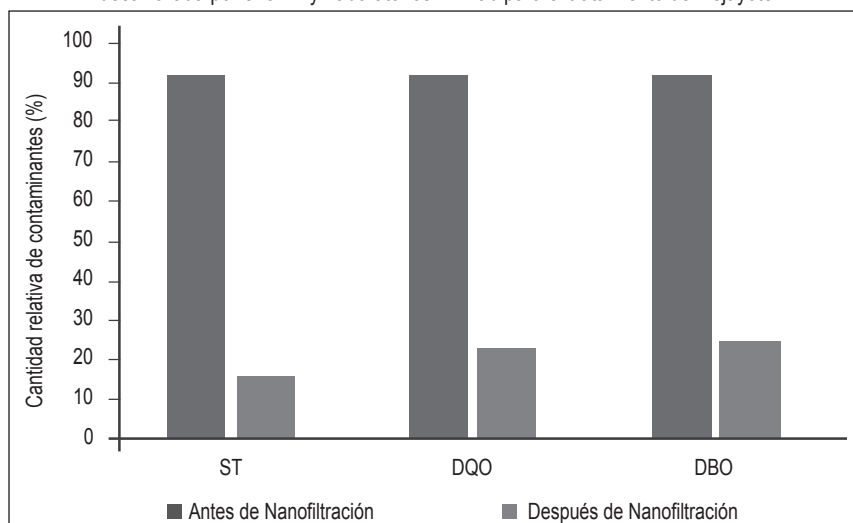
Gráfica 2. Efecto de distintos tratamientos desarrollados para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) del nejayote.

Sin tratamiento, tratamiento con floculantes (Ramírez-Romero et ál., 2001 y González-Martínez, 1984), tratamiento desarrollado por el CIAD-Laboratorios Minkab



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3. Efecto sobre sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), con la tecnología de membranas (nanofiltración) desarrollada por el CIAD y Laboratorios Minkab para el tratamiento del nejayote



Fuente: elaboración propia.

agua residual, calificada usualmente como muy contaminante, se puede considerar como materia prima para la obtención de compuestos de alto valor o para el desarrollo de procesos biotecnológicos.



Caso regional: Sonora

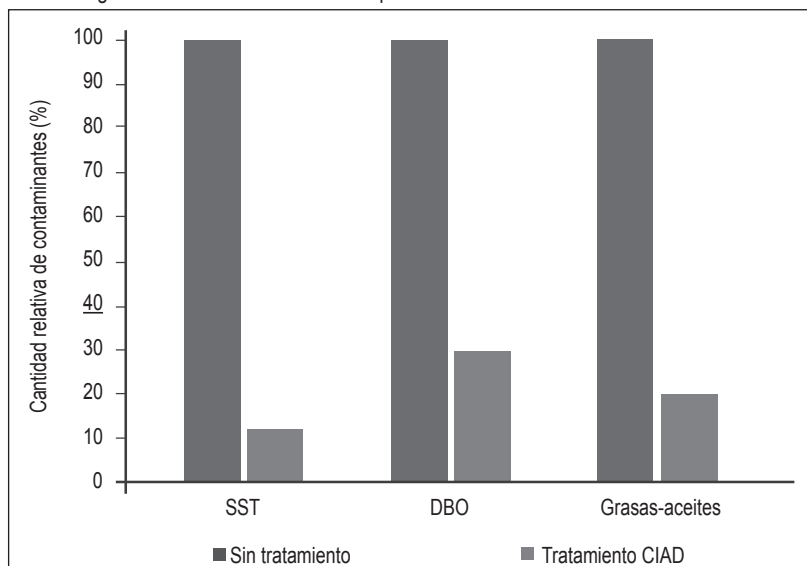
La ganadería ha sido un sector tradicional en el estado de Sonora, particularmente en los municipios de Ciudad Obregón, Navojoa y Hermosillo. La avicultura, ganadería bovina y porcicultura han sido las principales actividades ganaderas. En el año 2010, la producción porcina estatal fue de 494,217 toneladas con un valor de 10,728,408 miles de pesos, correspondiendo al municipio de Hermosillo la producción de 94,095.99 toneladas de ganado en pie y 71,251.7 toneladas de carne en canal (SIAP, Sagarpa, 2011).

Cabe destacar que en los últimos años la porcicultura ha tenido un fuerte desarrollo, a través de la adopción de tecnología moderna, lo que permite que sus productos destaquen en el mercado nacional e internacional. Sin embargo, uno de los principales problemas de la porcicultura es que durante la producción de cerdos y el procesamiento de la carne, se genera una gran cantidad de desechos orgánicos que, de no manejarse adecuadamente, tienen efectos contaminantes. Los desechos comprenden residuos sólidos y líquidos que son acarreados por el agua en los procesos de lavado de las instalaciones, conteniendo el estiércol y orina de los cerdos, además del alimento no consumido. Otra contribución a los desechos lo constituyen las aguas de lavado de las plantas de sacrificio, que acarrear altos niveles de contaminantes como son sangre, pelo, contenido estomacal, grasa, huesos y vísceras. El conjunto de elementos son los que impactan fuertemente en las aguas residuales de la porcicultura y que, dadas las características de su contenido, acarrear elementos patógenos y contaminantes, conduciendo a que las autoridades ambientales y de administración del agua intervengan para mitigar su impacto (Aguilar, 2007). Es importante resaltar que los rastros municipales consumen una gran cantidad de agua potable, por lo que compiten por ella con la población local y contribuyen al aumento de la demanda de nuevas instalaciones hidráulicas.

En este campo, durante el 2011 se colaboró con una empresa local dedicada a la producción, procesamiento y comercialización de carne de cerdo, para apoyarla en el diseño de un proceso que permita mejorar la eficiencia de un sistema de tratamiento que viene implementando para sus aguas residuales.

A través de la aplicación de tratamientos y operaciones unitarias adecuadas que facilitaron la floculación y separación parcial del material contaminante, se logró disminuir los valores de diversos parámetros, entre los que destacan los sólidos suspendidos totales (SST), con una reducción de entre el 65-78%. Con estos porcentajes de remoción, se alcanza el cumplimiento del valor límite establecido por la NMX-AA-034-SCFI-2011 para el parámetro de SST. Bajo los tratamientos evaluados, se consiguió también una reducción del 70% en los valores de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y un valor similar en el de Grasas y Aceites (GA) (gráfica 4). Si bien la reducción de los SST conllevó implícitamente a una reducción de la DBO total, destacó el hecho de que se hubiera logrado disminuir también las GA, esto posiblemente debido a que el material floculado absorbió y/o adsorbió esta fracción.

Gráfica 4. Efecto sobre sólidos suspendidos totales (SST); demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y grasas-aceites del proceso desarrollado por el CIAD para el pretratamiento de las aguas residuales de una industria procesadora de carne de cerdo en Sonora



* Estimada en relación a la cantidad inicial de contaminantes.

Fuente: elaboración propia.

Durante los análisis realizados, se observó que en promedio, 58% del material proteico de los efluentes descargados fue removido junto con los flóculos separados. Dicho valor es interesante desde una perspectiva de negocio, porque podría representar un material que puede tener un valor comercial si es estudiado y procesado adecuadamente o aplicado en la producción de bioneréticos.

El proceso desarrollado en el CIAD es perfectamente compatible con el sistema de tratamiento que viene implementando la empresa, que incluye como parte final del mismo, lagunas de oxidación para la degradación biológica de los contaminantes remanentes. La reducción en más del 70% de los tres principales contaminantes (SST, DBO y GA), con el proceso desarrollado permitiría prolongar la vida útil de las lagunas, asegurando su funcionamiento óptimo y por consiguiente el cumplimiento con la normativa ambiental vigente en los parámetros de descarga. Un aspecto importante a destacar es que la implementación del proceso requiere inversiones de baja cuantía y el costo unitario estimado del tratamiento es de \$1.35/m³, el cual resulta muy competitivo en relación a otras tecnologías.

Este tipo de proyectos a nivel local se encuentran totalmente acordes al Plan Estatal de Desarrollo Sonora 2009-2015, que establece un claro compromiso para que el estado sea líder nacional en generación de empleos, crecimiento sostenido y desarrollo económico sustentable a través del desarrollo tecnológico y de la innovación. Además, se incrementará la competitividad de las unidades económicas, generando un entorno atractivo y facilitador de negocios. En este contexto se ratifica el compromiso del CIAD, para impulsar el desarrollo económico y social



con responsabilidad ambiental y de cuidado hacia las nuevas generaciones, a través de tecnologías más limpias y amigables con el medio ambiente.

Conclusiones

Tomando en cuenta que el agua es un elemento indispensable para la vida y el desarrollo de prácticamente de todas las actividades humanas, es necesario que cada estamento de la sociedad asuma plenamente un compromiso con su cuidado, que debe ser considerada un bien escaso, de manera que se establezcan mecanismos para reducir su desperdicio, evitar su contaminación, facilitar su tratamiento y su reuso. Por lo tanto, resulta urgente la racionalización del uso del agua para que el desarrollo de la población no se vea obstaculizado, ya que el agua ha pasado de ser un factor promotor de desarrollo a un factor limitante.

Las tecnologías ambientales ofrecen beneficios en términos económicos, ambientales y en relación con los usuarios y la sociedad, siempre que se apliquen de forma adecuada los conocimientos científicos y tecnológicos para introducir la innovación. En el tema de gestión de residuos, como son los efluentes líquidos industriales, la experiencia de nuestro grupo de trabajo nos muestra que hay nichos de oportunidad interesantes para la innovación.

Desde una visión holística, la prevención es mejor que la remediación, aunque para los casos donde la generación de efluentes es ineludible, en algunas ocasiones es posible transformar el riesgo medioambiental que representan en oportunidades de negocio. Para el caso de estudio nacional, se presenta como el tratamiento innovador de las aguas residuales de la industria del nixtamal, no solo resuelve la problemática ambiental usualmente provocada, sino que logra la recuperación de cada uno de sus componentes para hacer factible la creación de una cadena de valor, con todo el impacto socioeconómico que esto conlleva. En un caso regional, se muestra el desarrollo de un método y proceso apropiados que permiten separar, como paso intermedio, gran parte del material contaminante contenido en los efluentes de una industria cárnica, asegurando mayor vida útil de sus lagunas de oxidación. Si bien no se ha ahondado en el estudio, el material separado podría ser empleado en un área estratégica del quehacer mundial, como es la producción de bioenergéticos.

Bibliografía

- Aguilar, A. G. (2007) "Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario" en *Claridades Agropecuarias*. Aserca, Sagarpa. Vol. 168, pp. 3-40.
- Asaff, A. (2010) "Transformando riesgos en oportunidades: del nejayote a la vainillina" en *Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de México, PCTI* [en línea] núm. 60. agosto de 2010, México, (ed.) Héctor Nolasco Soria, disponible en: <http://>

- pcti.mx/tesis-de-posgrado-en-mexico/doc_download/130-pcti-60-transformadores-riesgos-en-oportunidades-del-nejayote-a-la-vainillina.
- Asaff, A., M. de la Torre y R. M. Macías (2008) *Proceso para la recuperación de ácido ferúlico*. Patente Mexicana MX 259521.
- Asaff, A., R. Macías y M. de la Torre (2011) *Proceso para producir vainillina a partir de microorganismos inmovilizados por cultivo de superficie*. Patente Mexicana MX 285753.
- Bejarano, C. et ál. (2009) *Quick Corn Nixtamalization Process*. International Patent WO/2009/143416.
- Caire, G. (2004) "Retos para la gestión ambiental de la cuenca Lerma-Chapala. Obstáculos institucionales para la producción del manejo integral de cuencas", en Helena Cotler (ed.), *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. México, Instituto Nacional de Ecología.
- Cifuentes, E. et ál. (2002) "Indicadores de calidad del agua en la cuenca sur (Xochimilco-Tláhuac). Riesgos para la salud y perspectivas de control" disponible en: <http://www.paot.org.mx/centro/temas/agua/fideicomiso/agua04.pdf> (27 de marzo de 2007).
- Civit, E. et ál. (1984) "Anaerobic Treatment of Maize Processing Waste-water (nejayote) in Packed Bed Reactor Cascade" en *Environmental Technology Letters*. Vol. 5, núm. 2, pp. 89-92.
- Clarke, R. y J. King (2004) *The Atlas of Water*. Earthscan, London, pp. 128, New Press, Nueva York. p. 127.
- Conagua (2010) *La Conagua en acción*. Edición 2010, México, Comisión Nacional del Agua (CNA), Semarnat, Gobierno Federal.
- (2011) *Estadísticas del agua en México*. Edición 2011. México, Comisión Nacional del Agua (CNA), Semarnat.
- Durán de Bazúa, C. (1983) *Tratamiento de los efluentes de la industria del maíz en México*. Disertación doctoral, versión en español del original en alemán, Facultad de Química, UNAM, México, pp. 248.
- Figuerola, J. D. C.; Rodríguez-Chong, A. y J. J. Véles (2006) *Proceso ecológico de nixtamalización para la producción de harinas masa y tortillas integrales*. Solicitud de Patente Mexicana PA/a/2005/011797.
- González-Martínez, S. (1984) "Biological Treatability of the Wastewaters from the Alkaline Cooking of Maize (Indian Corn)" en *Environmental Technology Letters*. Vol. 5, pp. 365-372.
- Hartmann, L. y C. Durán de Bazúa (1981a) "Biological Treatment of Effluents of the Maize Industry in Batch and Continuous Laboratory Tests" en *Proceedings 2nd World Congress of Chemical Engineering*. Montreal, pp. 601-605
- (1981b) "Produktion von biomasse aus hochkonzentrierten. Abwassern der lebensmittelindustrie" en *Wiss. U. Umwelt*. Vol. 3, pp. 141-145.
- INEGI (2007) *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua*. México.
- Pacheco-Vega, R. (2005) "Applying the Institutional Analysis and Development Framework to Wastewater Management Policy in the Lerma-Chapala River Basin" en *International Workshop Water and Ecosystems and Providing for Human Needs*. Hamilton, ON, Canadá.
- Poder Ejecutivo Federal (2007) *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*. México, Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Ramírez-Romero, G. (2011) "Eliminación de sólidos suspendidos en nejayote y manejo para su reutilización" en *Memorias del Simposium Internacional sobre Tecnologías Convencionales y Alternativas en el Procesamiento de Maíz*. Chihuahua, Chihuahua. México, agosto.



- Rosentrater, K. A. (2006) "A Review of Corn Masa Processing Residues: Generation, Properties and Potential Utilization" en *Waste Management*. Vol. 26, pp. 284-292.
- Sánchez y de la Cámara, F. (2004) *Production Process of Broken, Nixtamalized, Dehydrated Corn Grain Using any Kind of Corn*. International Patent WO/2004/023892.
- Sanz, J. y S. Villar (2005) *Tecnologías ambientales*. Serie de informes de tecnologías clave de la Comisión Europea (trad.) de Weber, M. K. *Environmental Technologies*. Background paper for the European Commission's High Level Group on "Key Technologies". España, CITME, Sistema Madrid.
- SIAP (2011) *Resumen estatal pecuario porcino 2010*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=371.
- Tortajada, C. (2002) "Abastecimiento de agua y manejo de descargas residuales en México: un análisis de las políticas ambientales" en *Agua, cultura y sociedad en México*. Patricia Ávila-García (ed.), Zamora, El Colegio de Michoacán-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 233-246.
- Viniegra-González, G. y G. Ramírez-Romero (2007) *Proceso de utilización del nejayote*. Solicitud Patente Mexicana MX/A/2007/010310.
- Wilkinson, J. y J. Short (1998) *Process for Producing Nixtamal and Masa Flour*. European Patent EP0883999.
- World Commission on Environment and Development (1987) *Our Common Future*. Oxford, Oxford University Press.