

Tratamiento y Calidad del Agua

Potabilización

A solicitud de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sin. (JAPAC), se elaboró la ingeniería básica de una planta potabilizadora de 300 l/s para remover el hierro y el manganeso del agua que se abastece a la población. La JAPAC, por su parte, desarrolló el proyecto ejecutivo de la planta, bajo la supervisión del IMTA, y actualmente propone el proyecto al gobierno del estado con la finalidad de obtener apoyos económicos y financieros para la construcción.

Se recibió una solicitud de Pemex Refinación para elaborar el diagnóstico de factibilidad técnica, económica y ambiental para la modificación de la planta desmineralizadora UDA-400, a construirse en la refinería Héctor R. Lara Sosa, Cadereyta de Jiménez, NL. El proceso —factible técnica, económica y ambientalmente— incluye filtros multimedia, desinfección con luz UV, ultrafiltración, ósmosis inversa, intercambio catiónico, decarbonatación de tiro forzado e intercambio aniónico. Sin embargo, el proyecto es muy sensible a cambios en los precios de los insumos y corre el riesgo de no ser rentable con la configuración actual; por ello, se recomendó eliminar las etapas de filtración multimedia y la desinfección con luz UV, ya que con la ultrafiltración es posible retener la mayor parte de los sólidos en suspensión de hasta $0.08 \mu\text{m}$, incluyendo las bacterias, por lo que el agua producida tendrá un índice de incrustación de <3 , estará libre de bacterias y en condiciones de alimentar a la ósmosis inversa para continuar el proceso de tratamiento. Con estas acciones la tasa interna de retorno (TIR) del proyecto aumentaría de 14.45 a 15.85% y, en todos los casos planteados en el análisis de sensibilidad, la TIR es mayor a 12 por ciento.

En lo referente al ámbito internacional, se recibió una solicitud de la Universidad Estatal de California, Campus Berkeley, EUA, para evaluar un dispositivo doméstico de desinfección de agua de consumo humano mediante lámparas de radiación ultravioleta llamado tUVo, que puede ser fabricado por los mismos usuarios con un costo aproximado de 420 pesos. Se inició la evaluación conforme a la NOM-180-SSA1-1998, *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Equipos de tratamiento de tipo doméstico. Requisitos sanitarios* y, como resultado, se determinó que el equipo cumple con las especificaciones de la norma antes mencionada y se consideró efectivo para la desinfección del agua. Actualmente, después de hacer algunos ajustes al diseño del equipo, el IMTA lleva a cabo pruebas de campo para evaluar el uso, efectividad y aceptación del tUVo en una comunidad rural de Morelos. Hasta el momento, el tUVo ha tenido aceptación por parte de los usuarios debido a que es un método rápido, no altera el sabor del agua y otorga beneficios a la salud y a la economía de las familias usuarias.

Con respecto a la remoción de arsénico del agua, se trabajó en dos líneas principales: electrocoagulación y desionización capacitiva. El reactor experimental de electrocoagulación se probó utilizando agua del pozo del IMTA, a la que se agregaron $100 \mu\text{g/l}$ de arsénico. Con dosis aplicadas de 10 mg/l de hierro y valores del número de Camp ($G \cdot t$) cercanos a 10,000, se formaron flóculos de muy buena sedimentabilidad, logrando remociones del 91% del arsénico antes de filtrar. Por otra parte, se observó que el agua con conductividades eléctricas de $600 \mu\text{S/cm}$ y mayores evitan la pasivación de los electrodos, la eficiencia electroquímica es alta en el reactor y la producción de hierro es constante. A solicitud del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de

Gómez Palacio, Dgo., se realizaron trabajos de desionización capacitiva como son: pruebas de tratabilidad con el equipo DESEL®, obteniéndose un efluente con 5 µg/l, una eficiencia de remoción superior al 99% y una recuperación de agua de hasta 97% del caudal total. En cuanto al biosensor de *E. coli* para determinar arsenito y arsenato en agua, se propagaron los cultivos y se criopreservaron en glicerol. Además, se cuenta con una cepa nativa que sirve de control y se estandarizaron las técnicas de la evaluación de la β-galactosidas y el luminómetro.

Por otro lado, se han realizado proyectos con financiamiento de los fondos mixtos, tanto del Conacyt como de los gobiernos de los estados de Morelos y de Guanajuato, para captación y tratamiento de agua de lluvia. En Morelos se hicieron pruebas mediante filtración en múltiples etapas (Fime), pero fue necesario agregar un coagulante. Bajo este esquema, se construyó una planta Fime modificada y se rehabilitó la olla de captación Núm. 2. Para el caso de la operación de la planta, solo falta capacitar a los miembros del comité de agua de la comunidad. En Guanajuato se montaron dos trenes de tratamiento para potabilizar agua en la comunidad de Santa Ana: uno mediante Fime y otro compuesto por un filtro de matriz de arena y cantos rodados (FMACR), seguido por un filtro lento de arena. El esquema de Fime con tres prefiltros gruesos en serie, seguido de un filtro lento de arena (FLA) fue capaz de cumplir con la NOM-SSA1-127-1994 en color real y turbiedad para valores máximos en el agua cruda de 60 Pt-Co y 70 UTN, respectivamente. Para el



INSTALACIÓN PILOTO DE FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FIME)



VISTA DE LA PRIMERA COLUMNNA (FILTRRO GRUESO)

tren FMACR-FLA, los valores máximos en el agua cruda para cumplir con la misma norma, fueron 35 Pt-Co para color real y 50 UTN para turbiedad.

Se recibió una invitación de la Comisión Federal para Prevención del Riesgo Sanitario, para que el IMTA pueda participar en la revisión y actualización para la modificación de la NOM-SSA1-127-1994. Con base en una perspectiva de riesgos a la salud humana, se soportó técnicamente la necesidad de modificar los límites máximos permisibles de arsénico y flúor, así como la de incrementar el número y naturaleza de los parámetros necesarios para la vigilancia de la calidad del agua para uso y consumo humanos.

Calidad del agua

En el marco del convenio con Pemex relacionado con la *Elaboración de estudios y diagnósticos ambientales, muestreos y análisis para la caracterización de aguas residuales y cuerpos de agua en instalaciones de PEP, Región Sur y sus áreas aledañas*, se hicieron monitoreos de verificación de descargas en 26 instalaciones de la paraestatal, de los Activos Muspac, Cinco Presidentes y Jujo-Tecominoacán.

En cuanto al estudio *Calidad del agua del río Zahuapan e impacto de las descargas* efectuado a través de los fondos mixtos entre Conacyt y el gobierno de Tlaxcala, se elaboró un inventario, se aforaron, localizaron, muestrearon y analizaron 38 descargas residuales. En 23 de ellas se rebasaba la NOM-001-SEMARNAT-1996 para grasas y aceites y para DBO₅. En conjunto, el río recibe 38



RÍO ZAHUAPAN, ESTACIÓN DE MUESTREO, TLAXCALA

toneladas de DBO_5 diariamente, lo que deteriora su calidad en la zona urbana.

En el tema de fotocatalisis se obtuvo una forma de dióxido de titanio nanoparticulado sensibilizada con ftalocianina de hierro, con propiedades fotocatalíticas que superaron, en las condiciones probadas, las del dióxido comercial (Degussa y Aldrich). Este fotocatalizador es capaz de oxidar hasta en 99% el plaguicida carbofurano, en menos de dos horas de exposición al sol. Sin embargo, solo se logra una disminución en el carbono orgánico total de 50%, debido a la generación de subproductos, de los que se identificaron cinco. Este resultado es similar al obtenido con otros procesos avanzados de oxidación.

En el caso de tratamiento de agua con colorantes textiles, se ha logrado decolorar disoluciones de azul directo 2, colorante muy utilizado en la industria textil nacional, mediante Foto-Fenton en 45 minutos, mediante la aplicación de un sistema estático expuesto a la radiación solar. La disminución en la DQO y en el contenido de COT, después de dos horas de tratamiento, fue de 75%. Por otro lado, en muestras de un litro de agua residual procedente de la industria textil, que se sometieron a pruebas de degradación utilizando el sistema de colección solar canal parabólico compuesto ($\sim 0.1 \text{ m}^2$ de área de colección solar) en modo recirculación, se encontró que el color es eliminado completamente en un lapso de 15 a 60 min de reacción, según la naturaleza del colorante. Asimismo, se llevó a cabo una estimación de los parámetros de escalamiento del proceso, calculando que para tratar 100 l de agua se

requieren de, aproximadamente, 7 m^2 de superficie de colección solar. En el tratamiento fotocatalítico de aguas de lavado de envases de plaguicidas, se estudiaron las condiciones que permiten la oxidación de atrazina (hasta 50 mg/l) mediante el proceso Fenton activado con energía solar; este proceso genera como subproductos principales la deisopropilatrazina y la desetilatrastina. No hubo evidencia de la formación de ácido cianúrico, informado como subproducto refractario en otros tratamientos, y la 2-hidroxiatrastina apenas fue detectable a 1.2 mg/l . La reacción se efectuó utilizando una concentración de Fe^{2+} de 1.5 mM con adición escalonada de peróxido de hidrógeno. El experimento estuvo bajo radiación solar un tiempo total de 8.5 h, después del cual se logró una oxidación global de 96.6% y una remoción en el COT de 45 por ciento.



COLORANTE ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO



RESULTADOS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO

Se hicieron investigaciones para el tratamiento de agua proveniente del lavado de suelo contaminado con hidrocarburos, usando procesos avanzados de oxidación. Se probaron dos sistemas: la fotocatalisis con hierro/peróxido/UV y cobalto/peroximonosulfato/UV. Se determinó que ambos procesos, activados por energía solar, fueron capaces de llevar a cabo una degradación superior a 95% de los contaminantes hasta en 15 min de reacción. En cuanto a la desactivación de esporas (*Bacillus subtilis*) por medio procesos secuenciales fotocatalisis-desinfección, se lograron inactivar tres órdenes de magnitud de esporas (>99.99%), para el proceso fotocatalítico, y cuatro órdenes de magnitud, cuando el proceso se efectúa secuencialmente con aplicación de cloro como desinfectante en el mismo lapso, lo que hace competitivo el proceso en cuestión, tanto en eficiencia como en costo

Tratamiento de aguas residuales

Con el fin de generar un sistema de tratamiento de aguas residuales de bajo costo, de fácil operación y mantenimiento para pequeñas comunidades, se ha trabajado en el desarrollo de un sistema de biofiltración sobre materiales orgánicos tropicales. De 14 especies orgánicas identificadas, se realizó la evaluación en cinco; cuatro fueron seleccionadas como medios filtrantes, mismos que fueron probados en seis biofiltros experimentales, con y sin aereación forzada. Los resultados muestran que con esta tecnología es posible obtener agua tratada que cumple con los parámetros de descarga más estrictos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para protección a la vida acuática, a excepción del fósforo, el cual cumple para uso en riego agrícola y uso público urbano. Esta tecnología demostró ser eficiente en remoción de microorganismos patógenos sin tener que efectuar desinfección química. Con financiamiento de la organización civil Patronato de San Antón, el IMTA efectuó el proyecto ejecutivo para implementar y supervisar la instalación del sistema de biofiltración sobre materiales orgánicos tropicales en la Escuela Federal Núm. 2 de Cuernavaca, Mor., mismo que se iniciará y calibrará en 2007.

Asimismo, se determinó la capacidad del sistema de biofiltros sumergidos de flujo descendente en distintas condiciones de operación: carga orgánica, tiempos de residencia hidráulica y tiempos de



PRUEBAS DE BIOFILTROS SUMERGIDOS DE FLUJO DESCENDENTE

retención de biomasa. Para ello se utilizaron seis diferentes materiales de soporte sintético: granos de polietileno de alta y de baja densidad, granos de polipropileno, cubos de poliuretano, cinta de polietileno (SESSIL), esferas de cerámica y granos de tezontle rojo previamente triturado. Los biofiltros se operaron en continuo con cuatro diferentes cargas orgánicas y se evaluó su desempeño. Los mejores resultados se obtuvieron en los reactores con cinta SESSIL, con granos de polietileno de baja densidad y con cubos de poliuretano. La remoción del nitrógeno amoniacal, $N-NH_3$, depende más de la concentración de oxígeno disuelto en el reactor que de la carga orgánica. El efecto de la carga orgánica es mayor a menores concentraciones de oxígeno disuelto. Debido a los altos tiempos de retención celular, los biofiltros sumergidos tuvieron una generación de lodo residual 25 veces menor, comparada con la de los biofiltros percoladores.

En cuanto a cooperación internacional se refiere, se llevó a cabo el V Curso Internacional de Sistemas Integrados de Tratamiento de Aguas Residuales y su Reúso para un Medio Ambiente Sustentable. De esta manera, se concluye el Convenio de Colaboración con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón, mediante el cual se capacitó en estos temas a 68 estudiantes.

Con la finalidad de atender una de las líneas estratégicas más importantes del país, se hizo el *Estudio del mercado nacional para el tratamiento de aguas residuales y de la demanda de agua tratada para su reúso*, para el cual se identificaron cincuenta ciudades con más de 250,000 habitantes. Se definieron cuatro casos para determinar los sitios de oportunidad para el tratamiento de aguas

residuales: ciudades con alta disponibilidad natural del recurso, ciudades con bajo costo del agua por m³, ciudades con infraestructura suficiente para satisfacer la demanda a 2026 y ciudades con déficit de infraestructura de saneamiento a 2026.

Para la estimación de costos de inversión se consideraron los cuatro tipos de proceso de tratamiento más utilizados en el país: lagunas de estabilización, lagunas aeradas, filtro percolador y lodos activados. Se obtuvo, como conclusión, que el mercado de aguas residuales tratadas está en función de la demanda de agua, del volumen ofertado y de su calidad. Sin embargo, el precio del agua de primer uso y del agua residual tratada está íntimamente ligado a los aspectos culturales, entre ellos, la distribución del propio recurso. Por otro lado, la demanda potencial tiene como fundamento principal el crecimiento de las actividades humanas.

Como parte de los experimentos para tratar aguas residuales, se trabajó en la instalación de un humedal para determinar el impacto ambiental y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales en Erongarícuaro, Mich., que forma parte de la segunda etapa del Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro. El tren de tratamiento está conformado por: pretratamiento, sedimentador, humedal de lodos, humedal para el sobrenadante, laguna de maduración y humedal de pulimento. Al respecto, se concluyó el proyecto ejecutivo y la manifestación de impacto ambiental, y se realizó la evaluación y brindó asistencia técnica para la operación del humedal de Santa Fe de la Laguna, Mich. Como parte de la adecuada operación del sistema, se consideró la necesidad de capacitar a cuatro operadores seleccionados por la comunidad.



HUMEDAL DE SANTA FE DE LA LAGUNA, MICHOACÁN

Para Pemex se efectuó la cuantificación y caracterización del lodo residual estabilizado que se genera en la Petroquímica Cangrejera, S.A de C.V. Para ello, se elaboró el estudio de la deshidratación del lodo y el correspondiente para definir su disposición final o su utilización como sustrato en plantas ornamentales. Asimismo, se desarrolló el paquete de ingeniería básica y de detalle y se conformó el paquete para la licitación de la obra. Además, se efectuó la ingeniería básica y de detalle para la rehabilitación de la laguna de lodos y para la instalación de drenes, subdrenes y pozos para control de lixiviados. Asimismo, se elaboraron el informe preventivo de impacto ambiental y el estudio preliminar de riesgo, aplicados a la ingeniería básica y de detalle. La implantación de este proyecto permite dar una disposición o uso al lodo, cumpliendo con las NOM-004-SEMARNAT-2002, NOM-052-SEMARNAT-2005 y los artículos considerados en la Ley de Aguas Nacionales.

Los colorantes orgánicos de tipo azo son los más numerosos, si bien se pierde el 15% de la producción, aproximadamente, en los efluentes de industrias de síntesis y procesamiento. Al respecto, para efectuar las pruebas de tratabilidad mediante oxidación química, fueron seleccionados tres colorantes: amarillo ácido 36-monoazo (AA36), azul directo 2-diazo (AD2) y negro directo 38-triazo (ND38). Con la prueba de Fenton se obtuvo la oxidación de los tres colorantes con porcentajes de eliminación de color superiores al 99%, mientras que con el tratamiento biológico de biomasa suspendida, en un sistema combinado anaerobio-aerobio + carbón activado, se lograron remociones de DQO, color y toxicidad de 99% con los tres colorantes.

Hidrobiología y evaluación ambiental

En el marco de colaboración con la CFE, se realizó el Dictamen de Factibilidad Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico La Yesca. Para ello, se partió de la Manifestación de Impacto Ambiental Regional del Proyecto, fundamentalmente por estar ubicado entre Jalisco y Nayarit. Cabe destacar que el estudio fue efectuado por la Universidad de Guadalajara, tanto para este proyecto como para el *Proyecto hidroeléctrico El Cajón*; la información técnica de soporte está disponible. Otro factor importante que se consideró para llevar a cabo el dictamen de factibilidad técnica, fue el acuerdo que hace

mención al Presupuesto de Egresos de la Federación para el ejercicio fiscal 2006, en donde se establece que los programas y proyectos de inversión de infraestructura hidráulica mayores a 50 millones de pesos deben contar con el dictamen favorable hecho por expertos, sobre el análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental y, en su caso, sobre el proyecto ejecutivo, antes de iniciar alguno de los procedimientos de contratación. El resultado del análisis permitió concluir que el *Proyecto hidroeléctrico La Yesca* es ambientalmente factible.

Con la Conagua se desarrolló el proyecto *Indicadores biológicos sobre el cauce del río Verde, Jal.*, área de embalse de la futura presa El Zapotillo. El objetivo del proyecto es solventar diversas observaciones emitidas por la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental de la Semarnat. De esta forma, con el fin de identificar la calidad del agua del río mediante la utilización de organismos acuáticos, se efectuó el muestreo en siete estaciones a lo largo del río, desde la zona propuesta para el inicio del futuro embalse, hasta 2 km aguas abajo del sitio propuesto para la cortina. Por las características de la zona y la época del muestreo, durante el estiaje, los parámetros de campo indicaron una buena oxigenación del agua y poco contenido de materia orgánica, mientras que los organismos identificados confirman la buena calidad del agua. Asimismo, se estimó que la comunidad de macroinvertebrados bentónicos muestra gran capacidad de adaptación de un ambiente lótico a uno léntico.

Con apoyo del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua y la convocatoria Conagua-Conacyt 2004/2, relativo a Playas Limpias, en octubre de 2005 se inició en las bahías de Ixtapa y Zihuatanejo, Gro., la obtención y revisión de información ambiental, de servicios, social, oceanográfica, de infraestructura y de riesgo a la salud. Se desarrollaron tres campañas de muestreo de calidad del agua que incluyeron 31 sitios dentro de las bahías y un punto de referencia mar adentro, cinco sitios, influente y efluente en las cinco plantas de tratamiento que operan actualmente, 19 sitios en playa y un sitio en los escurrimientos pluviales y descargas puntuales, buscando coincidir con los sitios de muestreo que operan la Conagua y la Secretaría de Salud. Las tres plantas de tratamiento aportan diariamente a la bahía de Zihuatanejo, en promedio, 5,427 kg de DBO₅, 1,869 kg de sólidos suspendidos totales,

575 kg de grasas y aceites, 627 kg de nitrógeno total y 133 kg de fósforo total. Adicionalmente, se desarrollaron campañas de mediciones batimétricas de corrientes, mareas, estructura vertical de la columna de agua y parámetros climatológicos en ambas bahías. Asimismo, con base en visitas de inspección y muestreos efectuados en las tres plantas de tratamiento municipales de Zihuatanejo, se elaboró un diagnóstico del funcionamiento de las mismas, que indica la existencia de deficiencias en su operación y mantenimiento. Además, los



MUESTREO EN DESCARGA DE PLANTA DE TRATAMIENTO A LA LAGUNA LA SALINA, ZIHUATANEJO, GUERRERO



TOMA DE MUESTRAS CON BOTELLA VAN DORN EN IXTAPA-ZIHUATANEJO, GUERRERO

resultados de calidad microbiológica señalan que el principal aporte a la bahía de Zihuatanejo es a través de la descarga de la planta de tratamiento El Deportivo, que descarga en la laguna La Salina y esta, a su vez, se conecta con la bahía.

Mediante un convenio con la UAM-Iztapalapa se desarrolló el estudio de pruebas biológicas para la evaluación de sustancias tóxicas, mismo que sirvió de base para capacitar a personal de cuatro universidades y tres instituciones del sector a través de talleres teórico-prácticos, en el desarrollo de ejercicios de intercalibración de análisis de pruebas de toxicidad que les permitan, en el corto plazo, brindar servicios de análisis. Se emplearon los protocolos de prueba del IMTA ya calibrados para *Daphnia magna* y *Selenastrum capricornutum*, y para especies de cladóceros y algas nativas de las aguas de México, tales como *Ceriodaphnia dubia*, *Daphnia exilis*, *Macrothrix elegans*, *Simocephalus mixtus* y *Ankistrodesmus falcatus*. Tanto los

resultados de la capacitación como del programa de intercalibración fueron exitosos; las cartas-control para los tóxicos de referencia (cromo hexavalente Cr^{+6} , para *Daphnia magna*, y cobre Cu^{+2} para *S. Capricornutum*), mostraron valores muy consistentes entre los laboratorios participantes. La calibración del protocolo de *Daphnia magna* empleado con otras especies nativas de México, indica que el procedimiento es apto para llevarse a cabo con especies de cladóceros como *Daphnia exilis*, *Ceriodaphnia dubia*, *Simocephalus mixtus* y *Macrothrix elegans* al mostrar, en todos los casos, coeficientes de variación menores a 15%. Asimismo, la comparación de las respuestas de la concentración efectiva (CE_{50}) al cromo hexavalente empleado como tóxico de referencia para las distintas especies de cladóceros probadas, indicó que la sensibilidad a dicho tóxico fue: *Daphnia exilis* > *Ceriodaphnia dubia* > *Simocephalus mixtus* > *Daphnia magna* > *Macrothrix elegans*.