

## Metodología de modelamiento para la dispersión de contaminantes en la Laguna de Atlangatepec, en el Estado de Tlaxcala

Freddy Jimenez Mendoza<sup>a</sup>, Timothy D. Landry<sup>b</sup>, José Antonio Guevara García<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Investigación en Bioinorgánica y Biotecnología (LIByB). 21 de Octubre No.16. Fracc. Vista Los Volcanes II. Sta. Ursula Zimatlépec. Apizaco, Tlaxcala. México. C.P. 90450-CR-90301.

<sup>b</sup>Consultor y editor independiente en toxicología.

\*E-mail: jaguevarag@gmail.com

Recibido 23 de febrero 2015, Aceptado 22 de mayo 2015

### Resumen

En el Estado de Tlaxcala, es necesario incrementar la capacidad de respuesta a contingencias debidas a sustancias químicas peligrosas, puesto que en el pasado han ocurrido una importante cantidad de incendios en plantas químicas, derrames por volcadura y vertido de materiales peligrosos en zonas aledañas a cuerpos de agua y habitacionales, como en la zona de la Laguna de Atlangatepec. El acceso a programas gratuitos para el modelamiento de plumas de dispersión de químicos y para la evaluación de riesgo tóxico humano e impacto ambiental, hacen posible generar la capacidad de evaluación ambiental en tiempos cortos y mejoran la respuesta a emergencias por parte de los organismos civiles y gubernamentales. En este trabajo se modeló una contingencia ficticia de derrame de amoníaco en un punto de la Laguna de Atlangatepec. El amoníaco es segundo en la lista de químicos con mayor frecuencia de accidentes en México. Se utilizó el software EXAMS, para la determinación de las concentraciones del contaminante en el cuerpo de agua; el software gvSIG, para la geo-referenciación de la pluma de dispersión del contaminante; Google Earth, para la proyección geográfica de comunidades; y, finalmente, el paquete SADA, para la evaluación toxicológica de los sitios y poblaciones afectados por la pluma de contaminante. Como parte final del ejercicio se emitieron recomendaciones al Instituto Estatal de Protección Civil (IEPC), a la Coordinación de Ecología del Estado de Tlaxcala, y a la SEMARNAT-Tlaxcala, con respecto al Riesgo Tóxico Humano y de Impacto Ambiental. Esta misma metodología se puede utilizar para la evaluación de los riesgos para la salud en situaciones de contaminación crónica y contribuye a proyectar el curso de acción.

**Palabras clave:** modelamiento computacional, contingencia ambiental, amoníaco, Laguna de Atlangatepec, atención a emergencias.

### 1. Introducción

El estado de Tlaxcala es un importante corredor de transporte (DF a Veracruz), así como también incluye zonas industriales donde existen plantas de fabricación y procesamiento de productos químicos [1]. Esto ha ocasionado contingencias químicas en el estado de Tlaxcala que incluyen incendios en plantas químicas, derrames por volcadura y vertido de materiales peligrosos en zonas aledañas a cuerpos de agua y habitacionales. De esta forma, se reportaron 7 defunciones en el estado en el periodo 1998-2002, debido a emergencias ambientales asociadas con sustancias químicas [2], mientras que en un reporte del Instituto Mexicano del Transporte se muestra que entre 2006 y 2009 en Tlaxcala hubo un total de 21 accidentes carreteros de vehículos con transporte de materiales peligrosos, en donde hubo 5 muertos, 20 lesionados, y pérdidas por más de un millón de pesos [3]. La zona de la Laguna de Atlangatepec, al norte del Estado, se ha visto involucrada en eventos de derrames provocados de desechos tóxicos [4]. Estos incidentes ambientales muestran a la cuenca como una región de riesgo y de alta vulnerabilidad por lo que ante esta situación, en la Agenda Ambiental del Estado de Tlaxcala (2007) [5], una de las Propuestas Generales de Atención fue la de generar procedimientos de atención a

emergencias para derrames y hallazgos de residuos peligrosos abandonados, consensando ante autoridades del sector los procedimientos a seguir y en cuanto al rubro de generar procedimientos de atención a emergencias, se presentó la necesidad de contar con herramientas tecnológicas para responder tanto a la situación de contaminación crónica cotidiana como en los casos de emergencia por descargas tóxicas en los cuerpos de agua.

Estas herramientas tecnológicas deben proporcionar información de gran importancia para salvaguardar a la población y la integridad del medio ambiente, como por ejemplo, el tiempo de vida media de un compuesto tóxico en un cuerpo de agua, los niveles de concentración que puede alcanzar teóricamente, los subproductos de su degradación, y su patrón de dispersión dentro del cuerpo de agua, así como determinar los niveles toxicológicos tanto humanos como ambientales. A pesar de que Tlaxcala cuenta con procedimientos desarrollados por diferentes dependencias federales y estatales para actuar en caso de contingencias ambientales, no cuenta con herramientas y metodologías computacionales que permitan la predicción y visualización del grado de impacto de estas eventualidades.



El objetivo de este trabajo fue generar la capacidad que se necesita para atender contingencias de manera expedita con metodologías y procedimientos predictivos de modelación y representación virtual de accidentes ambientales, para emitir las recomendaciones correspondientes en el menor tiempo posible. Como demostración, se modeló el evento ficticio de una contingencia por derrame de 500 L de amoníaco en un punto de la Laguna de Atlangatepec (Figura 1), debido a que es el cuerpo de agua de mayor importancia en el estado de Tlaxcala, mientras que el amoníaco es segundo en la lista de productos químicos con mayor frecuencia de accidentes en México.

Uno de los elementos clave que es necesario para el presente modelo es su validación. Al respecto, Williams y col. señalan que el rendimiento del modelo de EXAMS se ha comparado con los datos medidos en una serie de pruebas de evaluación del sistema modelo para diferentes productos químicos (por ejemplo, tintes, herbicidas, insecticidas, fenoles, arrozales, bahías). Este modelo también contiene una opción de calibración que permite al usuario comparar los resultados de una simulación con los datos de campo si existen tales datos durante un periodo de tiempo determinado dentro de un sistema de distribución [14].

El Profesor Lawrence A. Burns, desarrollador de EXAMS, también ha considerado el aspecto de la validación, y al respecto asegura que EXAMS requiere una combinación de datos químicos y de cargas ambientales con el fin de especificar correctamente los parámetros del modelo [15]. Datos erróneos, inciertos o faltantes pueden resultar en la inadecuada parametrización del modelo, lo que conduce a errores en las predicciones del modelo. Ecuaciones de proceso excesivamente simples también pueden conducir a errores en las predicciones del modelo. Los casos de estudio que analiza Burns destacan incertidumbre en los parámetros y la incertidumbre del modelo. A pesar de estas fuentes de incertidumbre, parece que EXAMS es capaz de predecir las concentraciones de la mayoría de productos químicos orgánicos dentro de 2 órdenes de magnitud o menos en la columna de agua, y dentro de un orden de magnitud en el sedimento [15].

Un artículo que realiza la validación de EXAMS con datos de campo es el de Armbust y col. [16]. EXAMS se calibró primero utilizando las concentraciones de metilbencilfuron (BSM) y azimsulfuron (AZM), datos tomados en lisímetros experimentales que contenían 5 cm de agua y 50 cm de suelo de arrozal. Las simulaciones iniciales se llevaron a cabo suponiendo que estos pesticidas se degradan por hidrólisis y fotólisis directa en el agua, y por hidrólisis y metabolismo biológico en el suelo. Los resultados iniciales llevaron a la especificación de una vía adicional de degradación en columna de agua: la fotólisis indirecta, que produce radicales hidroxilo que degradan fotoquímicamente los pesticidas. De la calibración de EXAMS se infirió una concentración media

de radicales hidroxilo de  $7.6 \times 10^{-16}$  M para los estudios con lisímetros, con un coeficiente de dispersión agua-suelo de  $3.8 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/hr.

Posteriormente, EXAMS fue utilizado para modelar dos sitios de campo, Ushiku (0.09 ha) y en Nihonmatsu (0.10 ha). El contenido de carbono orgánico del suelo para estos arrozales fue 9.74% y 1.55%, respectivamente. La profundidad de la columna de agua y del suelo fue de 5 cm cada una. La concentración inicial de los pesticidas BSM y AZM fueron de 30 g/ha y 6 g/ha, respectivamente. EXAMS predijo con éxito la partición y las reacciones de degradación que se llevaron a cabo con tiempos de vida media de 3-4 días. La tasa de fotólisis indirecta utilizando las concentraciones de radicales hidroxilo calibrados representó una fracción significativa de la degradación. Las concentraciones de pesticidas en columna de agua pronosticadas generalmente coincidieron con los datos observados. EXAMS sobreestimó las concentraciones del suelo por factores de 2 a 4. Los autores concluyen que una "caracterización definitiva de la tasa de degradación y la movilidad de los dos productos químicos en un sitio específico requeriría información adicional sobre los parámetros ambientales y las interacciones suelo-químicas específicas del sitio." [16]

## 2. Parte experimental

Se realizó la evaluación de diversos paquetes para finalmente hacer uso del software EXAMS [6], para la determinación de las concentraciones del contaminante en el cuerpo de agua; del software gvSIG [7], para georeferenciar la pluma de dispersión del contaminante; de Google Earth [8], para la proyección geográfica de comunidades; y, finalmente, del paquete SADA [9], para la evaluación toxicológica de los sitios y poblaciones afectados por la pluma de contaminante.



**Figura 1.** Localización del municipio de Atlangatepec, en el Estado de Tlaxcala. Modificado de [1] y [12]. El municipio de Atlangatepec ocupa el 2.7% de la superficie del estado de Tlaxcala. Cuenta con 63 localidades y una población total de 5,487 habitantes. Pertenecer a la región hidrológica del Balsas; la corriente principal es el Río Zahuapan, sus cuerpos de agua principales son la Laguna de Atlangatepec y la laguna Jalnene [13].

Para producir el modelo en EXAMS, se decidió segmentar en 8 secciones de 24 compartimentos la laguna de Atlangatepec como un cuerpo geométrico regular; la



profundidad de la zona del Epilimnion se consideró de 8 m, distancia sugerida para la termoclina, la del Hipolimnion de 3.88 m y la capa béntica de 0.12 m. El flujo de agua es la dirección del caudal principal del río Zahuapan y basados en esta consideración se asignaron las rutas de dispersión y advección. Luego de calcular las concentraciones a 1 h, 24 h, y a 1 mes del amoníaco, los resultados (en forma de tablas) se exportaron al programa GvSIG y se les asignó a cada concentración de cada segmento un valor georreferenciado. Previamente, en GvSIG se obtuvo un raster de la Laguna de Atlangatepec mediante el servicio WMS (Figura 2). Los datos de concentraciones y coordenadas se convirtieron a un formato cvs y se exportaron a SADA. En esta plataforma se desarrollaron las capas correspondientes a las plumas de dispersión y se obtuvieron vistas en dos y tres dimensiones con códigos de colores. Las imágenes guardadas de las plumas de contaminación del amoníaco obtenidas en SADA se exportaron a Google Earth, para generar las capas de localización de las zonas habitacionales y de actividad económica. Finalmente, el criterio sobre el riesgo tóxico humano y de impacto ambiental se obtuvo sobre la plataforma de SADA utilizando los datos sobre las zonas habitacionales y las concentraciones de referencia RfC (*reference concentration*) y RfD (*reference dose*) publicadas por la Agencia de Protección al Ambiente de los E.U.A (EPA) y la ATSDR.

Los resultados se interpretaron para emitir recomendaciones al Instituto Estatal de Protección Civil (IEPC), a la Coordinación de Ecología del Estado de Tlaxcala, y a la SEMARNAT-Tlaxcala, con respecto al manejo de la contingencia, al Riesgo Tóxico Humano y de Impacto Ambiental.

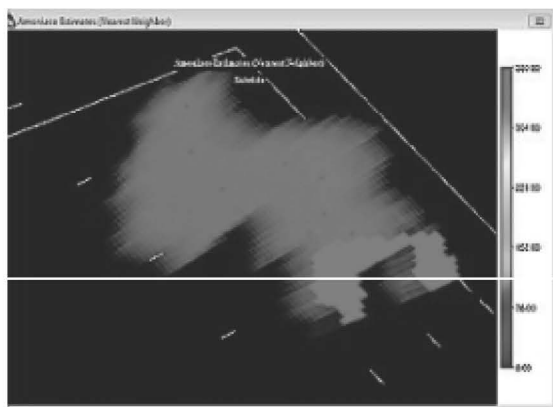


**Figura 2.** Imagen tipo raster de la Laguna de Atlangatepec, obtenido mediante el servicio WMS. La flecha señala el lugar del derrame ficticio.

### 3. Resultados y discusión

El amoníaco es un líquido altamente volátil que al aire libre no se moviliza a gran distancia, forma una nube que puede permanecer en el aire aproximadamente una semana; pero también es una sustancia muy soluble en agua (34 g/100 mL a 20°C), que reacciona para producir hidróxido de amonio, formado por el ion amonio que es reciclado naturalmente y existen en la naturaleza muchas maneras para incorporar y transformarlo. En el suelo o el agua, las plantas y los microorganismos incorporan el ion amonio rápidamente. En el caso de estudio, el amoníaco es vaciado en el agua a la orilla de la laguna, por lo tanto debemos esperar que la mayor parte del contaminante se integre al cuerpo de agua y una pequeña fracción se evapore en el proceso, permaneciendo sobre la parte afectada. Los resultados arrojados por el modelo computacional de EXAMS demuestran que después de una hora persiste el 99.99% de la descarga de amoníaco en el cuerpo de agua, con 379.2 kg en el segmento superficial y 0.00000349 kg en la capa béntica. Después de un día persiste el 99.70% de la descarga de contaminación, 361 kg en el primer segmento y solo habrá 0.00361 kg en la capa béntica (Figura 3). Después de un mes persisten 83 kg del amoníaco descargado en la laguna, de estos el 89.20% se sigue encontrando en la zona de epilimnion, 4.05% en el hipolimnion, y habrá avanzado hacia el centro de la laguna solo el 6.18%. En la capa béntica se sigue observando una concentración menor, teniendo tan solo 0.0115 kg del amoníaco. Esto se debe a que al ser la laguna un sistema léntico y por ser un cuerpo de agua polimíctico, su proceso de dispersión y advección es muy lento, impidiendo que el amoníaco se disperse de manera homogénea, dependiendo solo de la hidrodinámica del río Zahuapan que alimenta la laguna de Atlangatepec.

Con respecto a la capa de aire por arriba de la zona de derrame, se observa una rápida evaporación del amoníaco que sobrepasa el valor de RfC y por eso se debe impedir obligatoriamente que las personas se puedan acercar y exponer al contaminante. Cerca de la zona de contaminación se localizaron 7 comunidades y varios asentamientos que pueden verse afectados por el derrame de amoníaco, casi la mayoría de asentamientos se localizan al Norte y al Este de la Laguna (Figura 4). Por lo tanto, la rivera de la laguna se debe acordonar y poner en vigilancia permanente, impidiendo el abasto de agua en las zonas de cultivos de peces y el abasto de agua de los cuerpos adyacentes a la laguna para evitar intoxicación por consumo humano. Se debe evitar el pastoreo y no usar agua para riego. Implementar sistemas de aireación para disminuir la concentración de amoníaco disuelto en agua, para acelerar el proceso de autodepuración, y llevar un control continuo del avance de autodepuración de la presa.



**Figura 3.** Imagen tridimensional elaborada con el software SADA alimentado con los datos de dispersión calculados con el programa EXAMS, para la Laguna de Atlangatepec un día después del derrame de amoníaco. En la parte derecha se observa el código de colores para las concentraciones (ppm).

Por otra parte, se identificaron 10 zonas de cultivo de peces cerca de la zona de contaminación, 2 áreas de cultivo se encuentran a la orilla de la presa, 4 se encuentran cercanos al sitio de contingencia y otros 4 que podrían ser afectados pero que se encuentran relativamente alejados. Solo una zona de cría de peces empieza a verse afectada hasta después de haber transcurrido un mes, no obstante se debe de considerar en riesgo desde el momento de la contingencia.

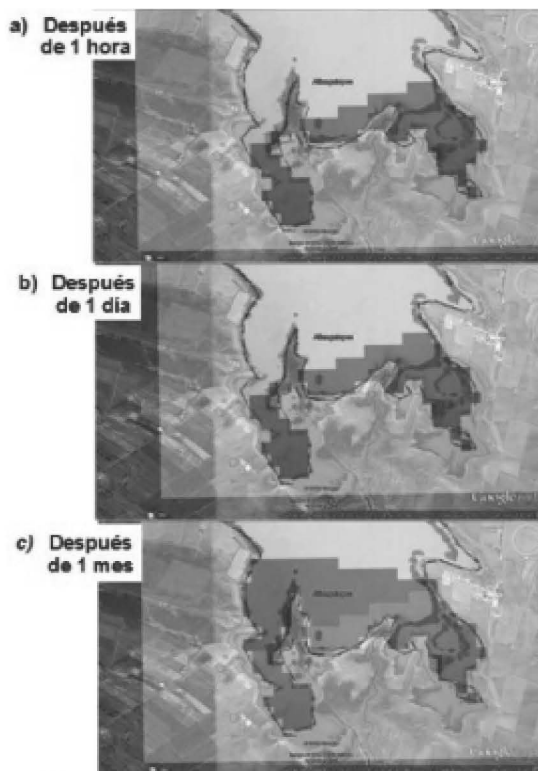
Con respecto al riesgo ecológico causado por el derrame, se puede estimar que la zona de mayor impacto ecológico se va a ver afectada en relación a la fauna silvestre de la localidad, dado que la laguna de Atlangatepec es un ecosistema acuático abierto, y su productividad es afectada, lo que daña de manera notable a la diversidad de especies de aves acuáticas, tanto migratorias como residentes; además de las poblaciones de peces e invertebrados.

En el caso de los procesos biológicos en el cuerpo de la laguna, EXAMS arroja resultados sobre los recursos del sistema, que se definen como aquellos factores que afectan al rendimiento sobre la que el sistema ejerce un cierto control. Recursos de un ecosistema acuático incluyen, por ejemplo, el pH en todo el sistema, la intensidad de la luz en la columna de agua, y las concentraciones de oxígeno disuelto. En el proceso contemplado, se observa que el oxígeno disuelto disminuye drásticamente mientras que el pH permanece elevado, esto, aunado al lento proceso de dispersión y advección, permite especular que el proceso de eutrofización se verá acelerado, por lo que también se verá afectada la vegetación natural en el embalse, principalmente la zona de tules que es donde se generó la contaminación, si esta zona se ve afectada, lo son también las especies de aves y peces que anidan en esta zona en especial.

Otro efecto de la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en agua, es que puede provocar la muerte

masiva de las especies de peces que se encuentran en el lugar de la pluma de contaminación.

Todo esto se debe de tomar en cuenta por que a nivel ambiental, una contingencia de este tipo pone en riesgo las especies de aves acuáticas que llegan a residir en ese lugar, pero principalmente las especies que se encuentran amenazadas, que se consideran endémicas o que se catalogan como especies raras, tales como: Garcita de tular, Garcita verde parduzca, Garzón gris, Garza morena o Garzón cenizo, Perro de agua o Teterete, Pato Mexicano, pato Triguero y el Pato Altiplanero.



**Figura 4.** Geolocalización del derrame de amoníaco sobre la plataforma de Google Earth, utilizando capas de zonas habitacionales y de actividad económica (recuadros). Se muestra el progreso de las concentraciones de amoníaco en agua después de 1 h, 1 día, y 1 mes. Se utiliza el mismo código de colores para las concentraciones (ppm).

#### 4. Conclusiones

El software EXAMS se ha aplicado con éxito en el modelamiento de la dispersión de pesticidas en campos de producción de arroz en California, el Delta del río Mississippi y la llanura costera del Golfo de los EE.UU [10] y predecir las concentraciones de Hg (0), Hg (II), y MeHg disueltos y absorbidos en la columna de agua y sedimentos del lecho subyacentes, dentro y fuera de las cuencas Albemarle-Pamlico, en Carolina del Norte y Virginia, EE.UU. [11]

Dentro de los alcances, podemos señalar que esta metodología proporciona una forma de realizar un modelo de dispersión de contaminantes para cualquier caso de derrame en un cuerpo de agua, y que en dependencia de la



calidad de los datos iniciales, puede llegar a determinar de manera confiable el destino, transporte y persistencia de una pluma de contaminante dentro del cuerpo de agua. Además el modelo obtenido puede llegar a ser usado para obtener valores de contaminación en lapsos de tiempo que puedan proporcionar un criterio de actuación para los organismos de protección civil, si se cuenta con la información de las variables necesarias y la capacidad de cómputo.

Por lo tanto, el modelo es más preciso mientras mejor se conozcan los parámetros que afectan el cuerpo de agua, por ejemplo: los flujos de agua, las temperaturas en los estratos, la precipitación pluvial, la forma y profundidad del vaso, la velocidad del viento, etc.

También es muy deseable que en el caso de producirse un derrame real, se pueda contar con un plan para recoger muestras y retro-alimentar el modelo, esto sería muy valioso para mejorar los criterios basados en los resultados del cálculo y para evaluar el modelo.

Es recomendable, que la metodología desarrollada se aplique a las descargas de sólidos suspendidos y de otros residuos que ingresan a la laguna de forma cotidiana por sus vertientes de alimentación, y que se hagan muestreos en los más puntos posibles de la laguna de parámetros tales como DQO, DBO, oxígeno disuelto, conductividad, etc. En este caso, la aproximación computacional correspondería a una contaminación crónica, pero que podría utilizarse para modelar una contingencia ambiental. Se recomienda tomar acciones que consideren pertinentes para la protección de la fauna presente en la zona afectada así como realizar una vigilancia permanente, Impedir el abasto de agua en las zonas de cultivos de peces, hasta que se normalice la presa. Así como impedir el abasto de agua de los cuerpos adyacentes a la Laguna de Atlangatepec hasta que se normalice la presa.

A protección civil se recomienda acordar la zona de contaminación hasta que la presencia de amoníaco sea tolerable. Así como delimitar la zona de pesca y evitar intoxicación por consumo humano. También se recomienda solicitar a la comunidad evitar el contacto con el agua de la zona afectada, así como evitar el pastoreo cerca de la zona y no utilizar el agua contaminada para riego.

A la SEMARNAT se le recomienda implementar sistemas de aireación para disminuir la concentración de amoníaco disuelto en el agua, esto es para acelerar el proceso de autodepuración que tiene la Laguna de Atlangatepec. Y llevar un control continuo del avance de autodepuración de la presa.

Por último, a la PROFEPA se recomienda vigilar los vehículos de transporte para dificultar un próximo derrame ilícito.

## 5. Referencias

1. INEGI (2011), Perspectiva estadística, Tlaxcala, [en línea]: <http://www.inegi.gob.mx/>.
2. Sarmiento Torres M. del R., Espinosa E. O., Álvarez Rosas J. (2003). Emergencias ambientales asociadas a sustancias químicas en México. Gaceta Ecológica, 66, 54-63. Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México.
3. Mendoza Sánchez J. F., Romero González L. F., Cuevas Colunga A. C. (2012). Vulnerabilidad de las carreteras por el transporte de materiales y residuos peligrosos. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 364. Sanfandila, Qro, 2012. ISSN 0188-7297.
4. La Jornada de Oriente Tlaxcala, 24 de enero de 2007. Sierra Nevada Comunicaciones, S.A. de C.V. Tlaxcala. [en línea]: <http://www.lajornadadeoriente.com.mx/2007/01/24/tlaxcala/tla204.php>.
5. <http://www.agendatlaxcala.com/policiaca/index.php?nota=segunda-reuni%C3%B3n-sectorial-del-medio-ambiente>.
6. <http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/exams-version-2980406>
7. <http://www.gvsig.org/web/projects/gvsig-desktop/official/gvsig-1.12/descargas>
8. <http://www.google.com.mx/intl/es/earth/>
9. <http://www.sadaproject.net/download.html>
10. Modeling Approaches for Pesticide Exposure Assessment in Rice Paddies. En Pesticide Mitigation Strategies for Surface Water Quality; Goh, K., et al.; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 2011.
11. Johnston J. M., McGarvey D. J., Barber M. C., Laniak G., Babendreier J., Parmar R., Wolfe K., Kraemer S. R., Cyterski M., Knights C., Rashleigh B., Suarez, L. Ambrose R. (2011). Ecological Modelling. 222, 2471–2484.
12. Pérez Velázquez P.A., Cruz Suárez L.E., Bermúdez Rodríguez E.A., Cabrera Macilla E., Gutiérrez Zavala R.M. Compiladores. (2002). Pesquerías en los cuerpos de aguas continentales de México. SAGARPA, Instituto Nacional de la Pesca. México, 168 p. ISBN: 968-800-544-4.
13. INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Atlangatepec, Tlaxcala, México. [En línea]: <http://www.inegi.gob.mx/>
14. Williams, P. R., Hubbell, B. J., Weber, E., Fehrenbacher, C., Hardy, D., Zartarian, V. (2010). An overview of exposure assessment models used by the US Environmental Protection Agency. Modelling of Pollutants in Complex Environmental Systems, 2, 61-131.
15. Ambrose R. B., Jr., Burns L. A. (2002). Quality Assurance Verification and Validation Tests for the Exposure Analysis Modeling System – EXAMS. Ecosystems Research Division National Exposure Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency. Athens, GA.
16. Armbrust, K.L., Y. Okamoto, J. Grochulska, A.C. Barefoot. (1999). Predicting the dissipation of bensulfuron methyl and azimsulfuron in rice paddies using the computer model EXAMS2. J. Pesticide Sci. 24(4), 357–363.