

## EVALUACIÓN REGIONAL DEL IMPACTO ANTROPOGÉNICO SOBRE AIRE, AGUA Y SUELO. CASO: HUASTECA HIDALGUENSE, MÉXICO

Alberto José GORDILLO MARTÍNEZ\*, René Bernardo Elías CABRERA CRUZ\*\*,  
Marisol HERNÁNDEZ MARIANO, Erick GALINDO, Elena OTAZO y Francisco PRIETO

Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Ciudad Universitaria C.P. 42076, Pachuca, Hidalgo, México, Tel. (771)717-2000 ext. 6785, 6786, 6787, Fax (771) 717-2000 ext. 5075, correo electrónico \*gordillo@uaeh.edu.mx \*\*rcabreracruz@yahoo.com.mx

*(Recibido octubre 2008, aceptado abril 2010)*

Palabras clave: evaluación de impacto ambiental, residuos sólidos

### RESUMEN

El estado de Hidalgo, México presenta una importante problemática ambiental que se manifiesta de manera heterogénea a lo largo de su territorio. Existe la necesidad de conocer las fuentes, tipos de agentes contaminantes y su magnitud. En este trabajo se realizó un inventario de la contaminación emitida por fuentes de origen industrial y doméstico en aire, agua y suelo en diez municipios de la región de la Huasteca por medio de la técnica de Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación Ambiental (ERFCA). El total de la contaminación emitida fue de 116 978.95 ton/año. Las emisiones al aire por vehículos a gasolina fueron un total de 11 039 ton/año, los vehículos a diesel emitieron 1521 ton/año. Para agua, las fuentes industriales aportaron 22 496 ton/año, las domésticas 15 776 ton/año. La contaminación emitida al suelo por residuos sólidos industriales fue de 4025 ton/año, los residuos sólidos urbanos emitieron 62 121 ton/año. Por municipio, Huejutla de Reyes fue el más contaminado en aire, agua y suelo con 53 % del total. A partir de estos resultados fue evaluada la calidad ambiental de cada medio, que con base en la normatividad mexicana, no es admisible para agua y suelo. Se construyó una base de datos con información relevante que apoyará el manejo eficiente de las emisiones contaminantes, la realización de estudios complementarios y promoverá la futura conservación de la calidad ambiental y la riqueza biológica de la zona.

Key words: environmental impact assessment, solid waste

### ABSTRACT

The state of Hidalgo, Mexico presents an important environmental problem that manifests itself in different ways. To identify the sources, types and the magnitude of pollutants, an inventory of sources of industrial and domestic pollution for air, water and soil in ten municipalities of the Huasteca Region of the state was carried out using the technique of Rapid Assessment of Sources of Environmental Pollution and the results are reported in this paper. A total of combined pollutants emitted was 116 978.95 tons/year. Gasoline vehicles contributed 11 039 tons/year of air pollutants and diesel vehicles 1521 tons/year. For water, industrial sources contributed 22 496 tons/year

and domestic effluents 15 776 tons/year. Soil pollution was a result of industrial solid waste, 4025 tons/year, and municipal solid waste, 62 121 tons/year. By municipality, Huejutla de Reyes is the most polluted in air, water and soil, with 53 % of the regional total. These results were evaluated in relation to environmental quality of each medium based on the Mexican regulations; these levels are above permissible limits for water and soil. A database with relevant information was prepared as a support for efficient management of pollutant emissions, provide base mark data for complementary studies, and to promote the future conservation of environmental quality and the biological richness of the area.

---

## INTRODUCCIÓN

El impacto producido en el ambiente debido a las actividades propias de la actuación del hombre se ha hecho cada vez más evidente y preocupante. La problemática ambiental presenta dentro de sus múltiples facetas dos vertientes importantes: el manejo irracional de los recursos naturales y un manejo inadecuado de los residuos generados por los diferentes procesos antrópicos (Tchobanoglous *et al.* 1998, Doménech 2000). En este esquema, es necesario realizar estudios de contaminantes para poder construir un perfil del desempeño ambiental a nivel nacional, regional, estatal y local. Con esta información es posible estudiar los impactos derivados de la actividad humana y la forma de vida de la sociedad, para contribuir al desarrollo de una gestión ambiental eficiente (Hernández *et al.* 2006). Los inventarios de contaminantes varían en su periodicidad de acuerdo con el tipo de residuo y de fuente emisora del que se trate; para agua se recomiendan estudios mensuales, para aire cada uno o dos años y para suelo bianual. En México, la normatividad establece la necesidad de realizar inventarios de contaminantes a través de un registro de emisiones y transferencia de contaminantes e integrar un informe bianual de la situación ambiental del país (SEMARNAT 1988). Los inventarios planteados en la legislación ambiental enfatizan tres grandes temas: residuos peligrosos, emisiones atmosféricas y descargas de aguas residuales, que podrían ser complementados por otro tipo de contaminantes, como es el caso de los residuos sólidos urbanos, y por fuentes de contaminación específica como los sectores minero, agrícola, ganadero, doméstico y de servicios (SEMARNAT 2006). Estas fuentes y estos tipos de residuos representan diferentes dimensiones de la problemática ambiental, dependiendo su importancia de la orientación económica de las distintas comarcas del país.

La construcción de inventarios de contaminantes es una tarea sumamente complicada debido a la

reticencia de los emisores para reconocer la responsabilidad que les corresponde dentro de un marco de degradación ambiental. Desconocen la existencia de áreas de oportunidad relacionadas con un manejo integral de los contaminantes en temas tales como uso más eficiente de materiales e insumos; mejor control de procesos; minimización de riesgos y primas de seguros; reducción de costos de disposición y manejo de efluentes, residuos y emisiones, entre otros (INE 1997). La realización periódica de inventarios de contaminantes cada vez más detallados, es una herramienta de gestión que permite construir bases de datos con las cuales se integren índices de calidad que sirvan para la toma informada de decisiones en materia de política pública ambiental. Se podría, ante todo, establecer el destino y los ciclos de vida de residuos y de productos desechados y con ello conocer cuál es el sitio de disposición final de los contaminantes, situación que hasta la fecha es incierta. Los criterios para seleccionar los métodos que permitan calcular las emisiones contaminantes, establecen que preferentemente se realicen monitoreos y mediciones directas a las fuentes, el inconveniente radica en los altos costos en tiempo y dinero, la dificultad para acceder a los puntos de muestreo y la necesidad de una infraestructura física, técnica y de recursos humanos especializados. Por otro lado, existen métodos indirectos basados en factores de emisión, tasas de actividad, estimación mediante datos históricos, balance de materiales, cálculos de ingeniería y modelos matemáticos de emisión (INE 1997, INE 2005). Actualmente los estudios de emisiones no se encuentran consolidados en México, siendo necesarios trabajos independientes que actualicen los datos ya publicados, permitan comparar con las bases de datos del gobierno, o bien, que llenen el vacío de información que existe en numerosas regiones de la República Mexicana.

En el estado de Hidalgo, en México, hasta la fecha existen pocos estudios reportados a nivel regional en la literatura (García y San Agustín 1994,

Cabrera *et al.* 2003, Cabrera *et al.* 2004, Cabrera *et al.* 2007, INE 2008). Hidalgo cuenta con un total de 84 municipios y una superficie de 20 905.12 km<sup>2</sup>; se ubica en la parte central de la República Mexicana, al oeste de la Sierra Madre Oriental, al noroeste de la altiplanicie meridional y en el sur de la planicie costera nororiental (INEGI 1997b). Se localiza entre las coordenadas UTM X 526 500 y 588 500; Y 2 297 500 y 2 366 600 (**Fig. 1**). El estado ha tenido un complejo desarrollo orográfico al ser confluencia de distintas provincias geológicas, en donde se distinguen diez zonas biogeográficas que poseen particularidades únicas. Las características del medio biótico y de la sociedad están influenciadas por los componentes del medio inerte, presentándose un escenario diferente en cada zona. El estudio de manera regionalizada de la problemática ambiental en Hidalgo permitirá identificar los impactos negativos de la actividad humana de una manera más enfocada a su realidad ambiental. Dentro de estas zonas, se encuentra la región de la Huasteca Hidalguense (RHH).

Para la RHH no se tiene información sobre los contaminantes de origen antrópico vertidos en aire, agua y suelo. Contar con información actualizada es de vital importancia, ya que para combatir la degradación ambiental y minimizar sus efectos adversos, es necesario establecer una línea base, conocer cuáles son las fuentes y los tipos de contaminantes emitidos. El objetivo del presente trabajo fue construir un inventario de emisiones contaminantes en aire, agua y suelo, determinar las fuentes, clases y cantidades de contaminación de origen doméstico e industrial y evaluar la calidad ambiental de la RHH utilizando una metodología rápida de construcción de inventarios de contaminación basada en factores de emisión. Para aire se consideraron partículas suspendidas totales, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y monóxido de carbono. Para agua, demanda bioquímica de oxígeno; demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo y aceite. Para suelo, residuos sólidos urbanos y residuos sólidos industriales. Con los resultados obtenidos se podrá formular un programa de monitoreo, control y prevención de emisiones en el área, que ayude a mejorar su entorno, elevar la calidad de vida de la población y conservar el patrimonio biológico de la zona.

## METODOLOGÍA

Para este trabajo se empleó la técnica de Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación Ambiental,

ERFCA (Weitzenfeld 1989). Este método permite la realización de inventarios de fuentes contaminantes y sus resultados son obtenidos mediante el empleo de indicadores de estado de calidad ambiental tipo Batelle, que establecen criterios de valoración en función a la producción de bienes o servicios de las diferentes fuentes generadoras de contaminación. Los indicadores utilizan factores de emisión recopilados de literatura técnica proveniente de países desarrollados (Sitting 1975, Schimmel y Griffen 1976, USEPA 1973, 1977, WHO 1971, 1977, 1982, 1983) y que fueron revisados por un comité de expertos de la Organización Mundial de la Salud para adecuarlos a las características de los países en vías de desarrollo económico. Esta técnica ha sido empleada en varios países de América Latina así como en el estado de Hidalgo (García y San Agustín 1994, Cabrera *et al.* 2003, Cabrera *et al.* 2004, Cabrera *et al.* 2007). Los factores empleados son capaces de estimar la variación de la contaminación en los medios aire, agua y suelo. Si bien existen otros sistemas, los métodos basados en factores de emisión son más rápidos, económicos y proporcionan resultados confiables al estar basados en la producción o consumo de energía. La técnica utiliza datos disponibles de los sectores público, social y privado, destacando las fuentes más importantes de generación que tienen un impacto significativo en el entorno. Esta técnica no considera fuentes emisoras relacionadas a la agricultura y la minería.

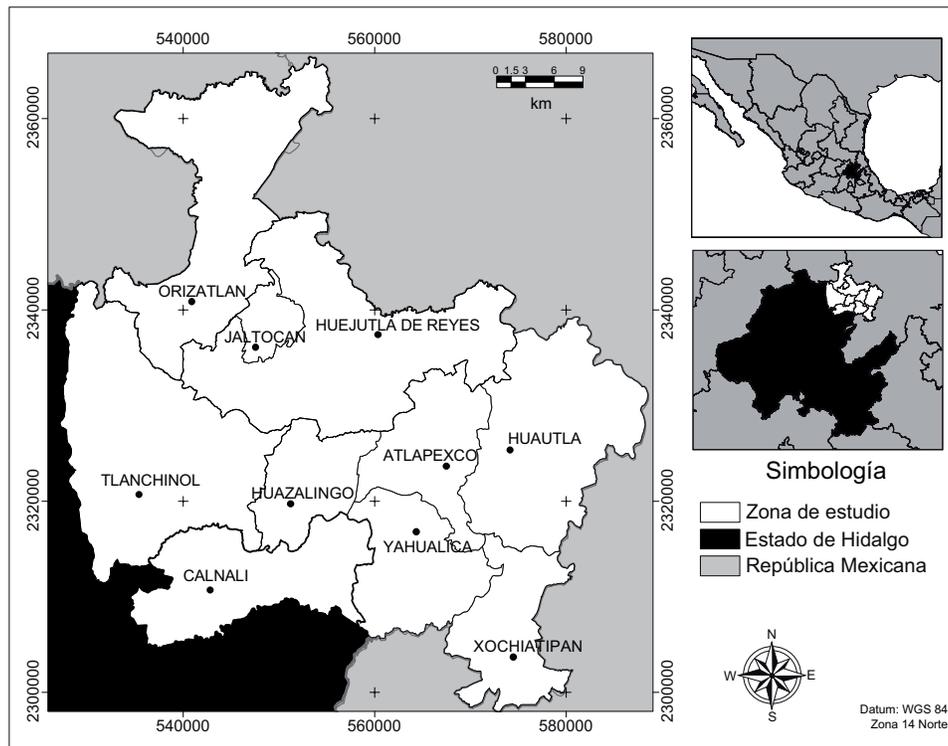
Para su desarrollo, la técnica ERFCA comprendió los siguientes pasos:

*Definición del área de estudio.* Se conformó por 10 municipios que integran la RHH y el Distrito Federal Electoral 01 (**Cuadro I**). La RHH se encuentra ubicada al noreste del estado, entre las coordenadas UTM X 526 500 y 588 500; Y 2 297 500 y 2 366 600, colindando con los estados de Veracruz y San Luis Potosí. Su distribución geográfica se puede observar en la **figura 1**. Es un espacio geográfico con altitudes desde 200 a 1500 msnm y una complicada orografía que incluye elevaciones, cañadas, valles y laderas tendidas (INEGI 1997a); con un clima cálido y semicálido húmedo, con abundantes precipitaciones todo el año (INEGI 1998); más de 1 000 km de ríos; suelos como rendzinas, litosoles, feozems y luvisoles. El tipo de vegetación predominante es de bosque tropical perennifolio (Rzedowski 1983, Challenger 1998). Estas características propiciaron que la RHH sea la zona con la mayor riqueza biológica del estado, por lo que está considerada dentro de diversas áreas prioritarias para la conservación,

**CUADRO I. MUNICIPIOS DEL ÁREA DE ESTUDIO, POBLACIÓN Y DATOS GEOGRÁFICOS**

| Clave INEGI | Municipio            | Población | Extensión (km <sup>2</sup> ) | Territorio estatal (%) |
|-------------|----------------------|-----------|------------------------------|------------------------|
| 28          | Huejutla             | 115 786   | 378                          | 1.8                    |
| 73          | Tlanchinol           | 33 694    | 380                          | 1.8                    |
| 11          | Atlapexco            | 18 769    | 85                           | 0.7                    |
| 46          | San Felipe Orizatlán | 38 472    | 308                          | 1.8                    |
| 25          | Huautla              | 22 521    | 288                          | 1.4                    |
| 26          | Huazalingo           | 11 863    | 113                          | 0.5                    |
| 32          | Jaltocán             | 10 265    | 48                           | 0.2                    |
| 14          | Calnali              | 15 815    | 190                          | 1.0                    |
| 80          | Yahualica            | 22 238    | 164                          | 0.7                    |
| 78          | Xochiatipan          | 18 157    | 149                          | 0.6                    |
|             | Total                | 307 580   | 2103                         | 10.5                   |

Fuente: INEGI 1997a

**Fig. 1.** Ubicación de la zona de estudio, los municipios que la integran y sus cabeceras municipales

tanto en regiones terrestres (Arriaga *et al.* 2000), como en zonas de preservación de cuerpos de agua (Arriaga *et al.* 2002) y de aves (Benítez *et al.* 1999). La información científica publicada sobre diversidad florística y faunística es mínima, estimándose que no está descrita en su totalidad. La información disponible en muchos casos no se encuentra depurada ni actualizada. La RHH posee una diversidad de flora de la que se reportan 75 familias representadas por 181 especies

(Puig 1976, Rzedowski 1983, Luna *et al.* 1994, Ortega y Castillo 1996, Rzedowski 1998, Villavicencio *et al.* 2003, Luna y Alcántara 2004, Villavicencio *et al.* 2005). Entre las especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2001 se encuentran *Ostrya virginiana*, sujeta a protección especial y *Magnolia dealbata*, endémica, en peligro de extinción (SEMARNAT 2002). En cuanto a diversidad de fauna, los estudios más completos se refieren a la riqueza

avifaunística y a la herpetofauna. Existen 456 especies confirmadas de aves, que representan el 46 % del total nacional reportado. Dentro de las especies protegidas se encuentran *Dendrotyx barbatus* en la categoría de peligro de extinción y *Cyanolyca nana* como de distribución restringida (SEMARNAT 2002, Martínez *et al.* 2007). Respecto de la herpetofauna, se reportan 12 especies de anfibios y 27 de reptiles así como diversas especies de mamíferos (Cervantes *et al.* 2002, Moreno y Sánchez 2002, Ramírez *et al.* 2004). Existen estudios que presentan evidencias de variaciones apreciables en la disminución de fauna nativa como efecto de la contaminación (Miranda *et al.* 2008), aunque no se conoce con certeza cuál es el estado actual.

La RHH presenta una superficie aproximada de 210 300 hectáreas; una población de 307 580 habitantes, el 13 % del total de la población estatal; una densidad de población de 135.7 hab/km<sup>2</sup>, la cual es considerada como alta (INEGI 2007); el municipio de Huejutla de Reyes, que se encuentra ubicado en esta región, es el tercer municipio más poblado del estado con 125 806 habitantes (COESPO 2009); la actividad económica fundamental en la región es agrícola, ganadera y de servicios ejerciéndose una fuerte presión sobre recursos como agua, suelo y biodiversidad. Dentro de las principales afectaciones diagnosticadas se tienen: contaminación de ríos y arroyos por aguas residuales, erosión hídrica, azolvamiento y desborde de ríos, desmontes, manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos, baja rentabilidad del trabajo agrícola y abandono de tierras de improductivas, pérdida de la biodiversidad y una baja calidad de vida de la población (UTHH 2008). En la RHH no se tienen reportados estudios de inventarios de contaminantes y en general hace falta información sobre el impacto que estos generan. Se desconocen con certeza las fuentes generadoras, los tipos de contaminantes emitidos, el estado de la calidad ambiental de la zona, los efectos de la actividad humana sobre la biodiversidad y los efectos económicos y sociales de la contaminación sobre la gente de la RHH. Es por ello que la situación actual de la zona de estudio es reconocida como un problema ambiental prioritario para el estado de Hidalgo (COEDE 2005, UTTT 2006, Romero *et al.* 2007).

*Recolección de datos para el sector industrial.* Consistió en la aplicación de protocolos para identificar las fuentes generadoras de contaminación, clasificarlas de acuerdo a las actividades manufactureras de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y realizar estudios de campo en donde se recabó la producción industrial de las fuentes de acuerdo a su

giro comercial. En los siguientes incisos se esquematizan las fases seguidas en esta etapa.

*Elaboración de una lista de fuentes de información.* Consistió en localizar aquellas fuentes que pudieran proporcionar datos sobre las industrias ubicadas en la zona de estudio. Se consideró inicialmente a dependencias federales, estatales y municipales; posteriormente a organismos privados empresariales (CANACINTRA 2005, COPARMEX 2005) y finalmente, se utilizaron fuentes de información general.

*Integración de la lista de control.* Con la información recolectada previamente, se elaboró una lista de industrias presentes en la zona de estudio. Se clasificaron con base en una lista de procesos industriales incluidos en los protocolos de la técnica ERFCA que incorporan factores de emisión de contaminantes de una serie de procesos correspondientes a los sectores de producción agrícola y ganadera; manufactura de productos y derivados de las industrias de alimentos, textiles, madera, papel, químicos, minerales no metálicos, minerales metálicos y metalmecánica. La lista de control quedó conformada por posibles fuentes contaminadoras clasificadas por municipio y por sector manufacturero.

*Recolección de datos en campo.* Se recolectó información en cada uno de los diez municipios de la zona de estudio en los sectores manufactureros identificados. Para las empresas clasificadas dentro de la fase anterior, se recabó información directamente. Se determinó la ubicación de las fuentes, si se encontraban en funcionamiento actualmente, si su giro comercial coincidía con el reportado en la etapa III.a y cuál era su producción industrial. Lo anterior se realizó de acuerdo con los principios de confidencialidad y reserva estadística que aplican en México (INEGI 2008). En el **cuadro II** se observa el número final de industrias identificadas en el presente trabajo.

*Recolección de datos para el sector no industrial.* Consistió en la recolección de información necesaria para la aplicación de los factores de emisión de fuentes no industriales considerados por los protocolos de la técnica.

Se recabaron datos de fuentes oficiales sobre población y servicios de infraestructura de cada uno de los municipios en las presidencias municipales, gobierno del estado y dependencias federales.

Se recabaron datos acerca de las características del medio físico, biótico y socioeconómico de la zona de estudio para construir un inventario ambiental y conocer las características de la región estudiada.

*Cálculos.* La técnica considera indicadores ambientales que sirven para valorar la calidad en aire, agua o suelo y que resultan útiles para visualizar la

**CUADRO II. NÚMERO DE INDUSTRIAS ESTUDIADAS POR SECTOR MANUFACTURERO**

| Municipio | Industrias analizadas              |  | Total |
|-----------|------------------------------------|--|-------|
|           | 11. Producción agrícola y ganadera | 31. Manufactura de alimentos, bebidas y tabaco |       |
| 28        | 42                                 | 1  | 43    |
| 73        | 25                                 | ----   | 25    |
| 11        | 15                                 | ----   | 15    |
| 46        | 22                                 | ----   | 22    |
| 25        | 18                                 | ----   | 18    |
| 26        | 7                                  | ----   | 7     |
| 32        | 5                                  | ----   | 5     |
| 14        | 21                                 | ----   | 21    |
| 80        | 17                                 | ----   | 17    |
| 78        | 20                                 | ----   | 20    |
| Total     | 192                                | 1  | 193   |

condición de alteración física, química o biológica de cada medio. Para determinar las cantidades de contaminantes generados, se aplicaron los factores de emisión contenidos en los cuadernos de trabajo de los protocolos de la técnica, agrupados en el caso industrial de acuerdo a sus diferentes actividades o giros manufactureros. Los protocolos distinguen entre aire, agua y suelo, considerando distintos indicadores ambientales en cada caso. Para cada medio se consideran fuentes industriales y no industriales. Los indicadores de las fuentes industriales varían en función al sector manufacturero al que pertenezcan. Se multiplicó el valor de los factores de emisión por la producción o consumo reportado de las empresas localizadas (**Cuadro II**). La operación anterior generó las cantidades de contaminación emitida en toneladas por año para cada caso. Los factores de emisión de la técnica consideran la generación de contaminación como una función lineal de la producción industrial o del consumo de energía.

Los resultados presentados para aire se agrupan de acuerdo a tres tipos de fuentes: estacionarias, móviles e industriales. En este estudio se determinaron fuentes móviles, que se encuentran divididas en automotores que utilizan como combustible diesel o gasolina. Los parámetros determinados fueron partículas suspendidas totales (PST), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO). En este caso se recolectó información sobre la cantidad anual de combustible consumido en el área de estudio tanto en la empresa estatal que distribuye el combustible como en las franquicias de venta.

Para agua se consideraron fuentes de origen industrial y doméstico clasificadas conforme a los

protocolos de la técnica. Se analizaron un total de 193 empresas (**Cuadro II**), de las cuales 192 se encuentran clasificadas dentro del sector de producción ganadera. La otra empresa correspondió a un matadero de ganado bovino. Para efluentes residuales domésticos, se determinó que porcentaje de la población tenía el servicio de agua potable y drenaje y qué porcentaje no contaba con estos servicios. Los indicadores que fueron empleados en el presente trabajo fueron: volumen de desecho, demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos (SS), nitrógeno (N) que se refiere al nitrógeno total, fósforo (P) que se refiere al fósforo total y aceite que se refiere a grasas y aceites de origen animal. Los indicadores que incorpora la técnica consideran que está diseñada para su aplicación en naciones no desarrolladas que presentan deficiencias o ausencia de una infraestructura de plantas de tratamiento de aguas residuales y requieren de un mínimo de información confiable para detectar prioridades ambientales en una zona de estudio. Los indicadores incluidos para efluentes domésticos son aquellos que se consideran mínimos indispensables para determinar el grado de contaminación de un efluente de esta naturaleza. Para el caso industrial, los parámetros considerados por la técnica varían de acuerdo a los diferentes tipos de procesos industriales encontrados.

En el caso del suelo se calcularon los aportes contaminantes de residuos sólidos de origen industrial y doméstico. Para residuos sólidos industriales, se consideraron la producción de las empresas encontradas y los factores de emisión de su sector. Los residuos industriales se clasifican en función a su giro y son muy heterogéneos. En este estudio se encontraron residuos generados en un rastro. Para las fuentes domésticas, se dividió la población entre urbana y rural. Se aplicaron los factores de emisión por tipo de zona económica y se calcularon los residuos sólidos de origen doméstico y de servicios.

*Organización de resultados y determinación de la calidad ambiental.* Las emisiones contaminantes estimadas se presentaron en matrices de acción-factor para los medios aire, agua y suelo, incorporando a las fuentes contaminadoras y a los indicadores ambientales. Se utiliza una unidad común de medida (ton/año), con lo que se logra visualizar de manera general la cantidad de contaminación emitida o bien por tipo de medio, por actividad de manufactura o por municipio del área de estudio permitiendo analizar y jerarquizar la emisión de contaminantes, identificando las prioridades. Con esta información se determinó el impacto de los contaminantes en

función a su calidad ambiental. La gravedad de los impactos producidos se determinó como admisible o no admisible en base a la normatividad mexicana para contaminantes atmosféricos, efluentes residuales y residuos sólidos. En 2004 y 2007 se obtuvieron resultados empleando la misma técnica para diversos municipios de Hidalgo, que corresponden a otras regiones del estado, con fuentes de diversos giros manufactureros y una mayor presencia industrial aunque no se determinó la calidad ambiental (Cabrera *et al.* 2003, Cabrera *et al.* 2004, Cabrera *et al.* 2007).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Contaminación del aire

En el **cuadro III** se pueden apreciar los datos de automotores a gasolina registrados en la zona de estudio y los resultados de sus emisiones por municipio. Para este caso se cuenta con un parque vehicular reportado de 6129 unidades y sus emisiones atmosféricas fueron de 11 039 ton/año. De acuerdo con el **cuadro III**, el municipio donde se emitió la mayor cantidad de contaminantes al aire por combustión de gasolina es Huejutla, seguido de San Felipe Orizatlán. En el resto de los municipios se emitieron cantidades menores (**Fig. 2**). El indicador ambiental más importante fue el CO, significativamente mayor que el resto de los contaminantes y que es un precursor del efecto invernadero. Esta distribución de la contaminación atmosférica en la RHH tiene una relación directa con la importancia económica y la población presente. Huejutla es la población más

grande de esta parte del estado, con el mayor nivel de renta económica, servicios y comercio. Su territorio tiene el mayor número de automóviles particulares, y por tanto se utiliza más gasolina, además de que la población de toda la RHH y de otros municipios aledaños de otros estados se traslada a su cabecera municipal, por ser polo de desarrollo económico en la región huasteca.

En el **cuadro IV**, se pueden apreciar los resultados de las emisiones de los automotores a diesel por municipio. Los vehículos registrados en la zona fueron 8359 y sus emisiones atmosféricas fueron de 1521 ton/año. El diesel es utilizado por automotores para el transporte de pasajeros y mercancías. Nuevamente, las emisiones más importantes por municipio, fueron en Huejutla (**Fig. 3**). Por tipo de contaminante, el que contribuyó en mayor medida fue el CO, seguido de los NO<sub>x</sub> y el SO<sub>2</sub>; el resto con 6 %.

Las características del parque vehicular de la RHH son similares a las encontradas a lo largo del territorio mexicano, en donde predomina el uso de gasolina sobre otras alternativas como diesel, gas, etanol u otros. A pesar de tener un número mayor de automotores a diesel que a gasolina, las emisiones de los primeros sólo representan el 12 % del total. Dentro de los indicadores, sólo el 7 % del CO es originado por los vehículos a diesel. No obstante, el diesel tiene un mayor nivel de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> (68 %) que la gasolina (32 %). A pesar de que el número de automotores a gasolina y diesel son similares, se encontraron diferencias significativas en cuanto a sus emisiones totales, en una relación de 10:1.

**CUADRO III.** CONTAMINACIÓN EMITIDA AL AIRE POR FUENTES DE COMBUSTIÓN MÓVILES CON MOTOR DE GASOLINA, POR MUNICIPIO Y TIPO DE CONTAMINANTE

| Municipio | Automotores registrados | Parámetro (ton/año) |                 |                 |       |          | Total (ton/año) | %     |
|-----------|-------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------|
|           |                         | PST                 | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | HC    | CO       |                 |       |
| 28        | 4449                    | 45.9                | 12.4            | 236.2           | 332.4 | 8643.7   | 9270.6          | 84.0  |
| 73        | 511                     | 0.9                 | 2.4             | 4.8             | 6.6   | 172.7    | 187.4           | 1.7   |
| 11        | 396                     | 0.1                 | 0.01            | 0.04            | 6.8   | 11.4     | 18.4            | 0.2   |
| 46        | 164                     | 6.3                 | 1.8             | 32.8            | 46.1  | 1199.6   | 1286.6          | 11.7  |
| 25        | 219                     | 2.0                 | 0.1             | 5.3             | 9.8   | 65.6     | 82.8            | 0.7   |
| 26        | 88                      | 0.1                 | 0.03            | 1.3             | 2.5   | 16.4     | 20.3            | 0.2   |
| 32        | 41                      | 0.3                 | 0.1             | 2.8             | 5.3   | 35.2     | 43.7            | 0.4   |
| 14        | 149                     | 0.5                 | 0.1             | 4.8             | 8.9   | 59.6     | 73.9            | 0.7   |
| 80        | 62                      | 0.2                 | 0.1             | 2.0             | 3.7   | 24.8     | 30.8            | 0.3   |
| 78        | 50                      | 0.2                 | 0.04            | 1.6             | 3.0   | 20.0     | 24.8            | 0.2   |
| Total     | 6129                    | 56.5                | 17.1            | 291.6           | 425.1 | 10 249.0 | 11 039.3        | 100.0 |

PST = partículas suspendidas totales; SO<sub>2</sub> = dióxido de azufre; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrógeno; HC = hidrocarburos; CO = monóxido de carbono

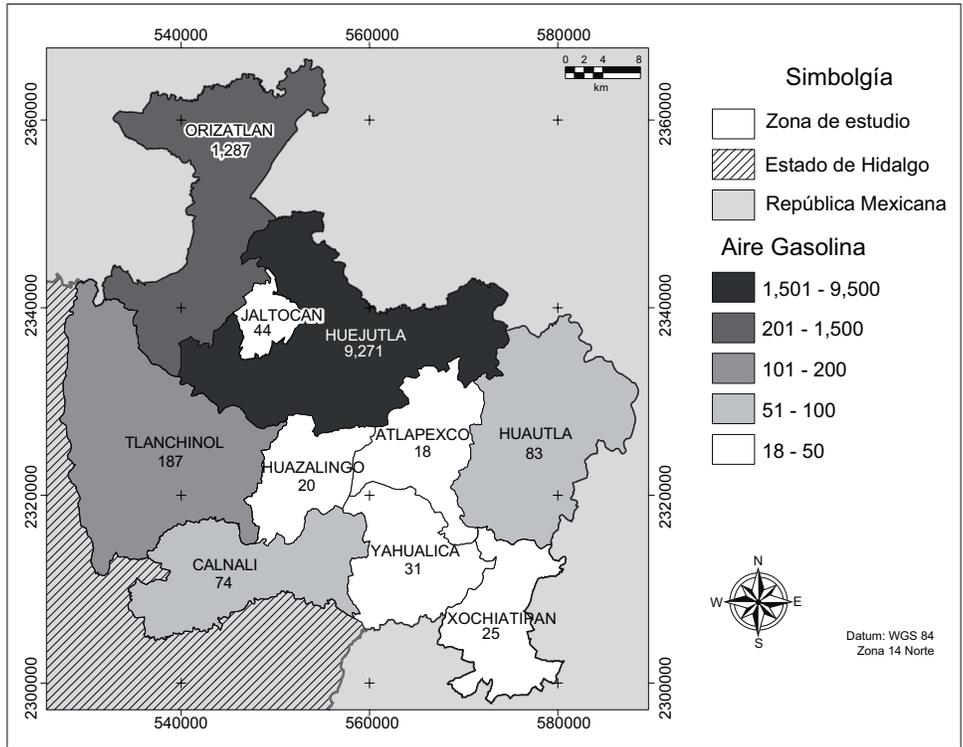


Fig. 2. Distribución por municipio de las emisiones de contaminación atmosférica por fuentes móviles en base a gasolina (ton/año)

CUADRO IV. CONTAMINACIÓN EMITIDA AL AIRE POR FUENTES DE COMBUSTIÓN MÓVILES CON MOTOR DE DIESEL, POR MUNICIPIO Y TIPO DE CONTAMINANTE

| Municipio | Automotores registrados | Parámetro (ton/año) |                 |                 |      |       | Total (ton/año) | %   |
|-----------|-------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|-----|
|           |                         | PST                 | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | HC   | CO    |                 |     |
| 28        | 5230                    | 20.9                | 165.5           | 95.8            | 22.6 | 378.9 | 683.7           | 45  |
| 73        | 811                     | 2.1                 | 17.1            | 9.9             | 2.3  | 39.1  | 70.5            | 5   |
| 11        | 601                     | 0.6                 | 0.2             | 3.1             | 4.3  | 113.1 | 121.3           | 8   |
| 46        | 367                     | 3.2                 | 25.7            | 14.8            | 3.5  | 58.8  | 106.0           | 7   |
| 25        | 299                     | 2.8                 | 5.5             | 77.1            | 7.7  | 46.6  | 139.7           | 9   |
| 26        | 284                     | 0.8                 | 1.7             | 23.1            | 2.3  | 14.0  | 41.6            | 7   |
| 32        | 110                     | 2.1                 | 4.3             | 59.6            | 6.0  | 36.1  | 108.1           | 7   |
| 14        | 388                     | 2.9                 | 5.8             | 81.5            | 8.2  | 49.3  | 147.7           | 7   |
| 80        | 128                     | 1.0                 | 1.9             | 26.9            | 2.7  | 16.3  | 48.8            | 2   |
| 78        | 141                     | 1.1                 | 2.1             | 29.6            | 3.0  | 18.0  | 53.8            | 4   |
| Total     | 8359                    | 37.5                | 229.8           | 421.4           | 62.6 | 770.2 | 1521.2          | 100 |

PST = partículas suspendidas totales; SO<sub>2</sub> = dióxido de azufre; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrógeno; HC = hidrocarburos; CO = monóxido de carbono

El principal problema de la contaminación atmosférica en la RHH se observa en Huejutla, en particular en su cabecera municipal, por fuentes móviles a gasolina. En el caso de automotores a diesel, en la RHH este tipo de vehículos son de transporte de mercancía o de personas a diferencia de otros países en donde los automóviles particulares en base a diesel son la

mayor parte del parque vehicular. Eso explica que las emisiones provenientes de estos automotores se encuentren distribuidas de manera más heterogénea en toda la RHH. Sin embargo, es en Huejutla en donde se concentra la mitad de las emisiones por este medio, lo que se suma a las emisiones provenientes de la gasolina. En futuros estudios se deben considerar

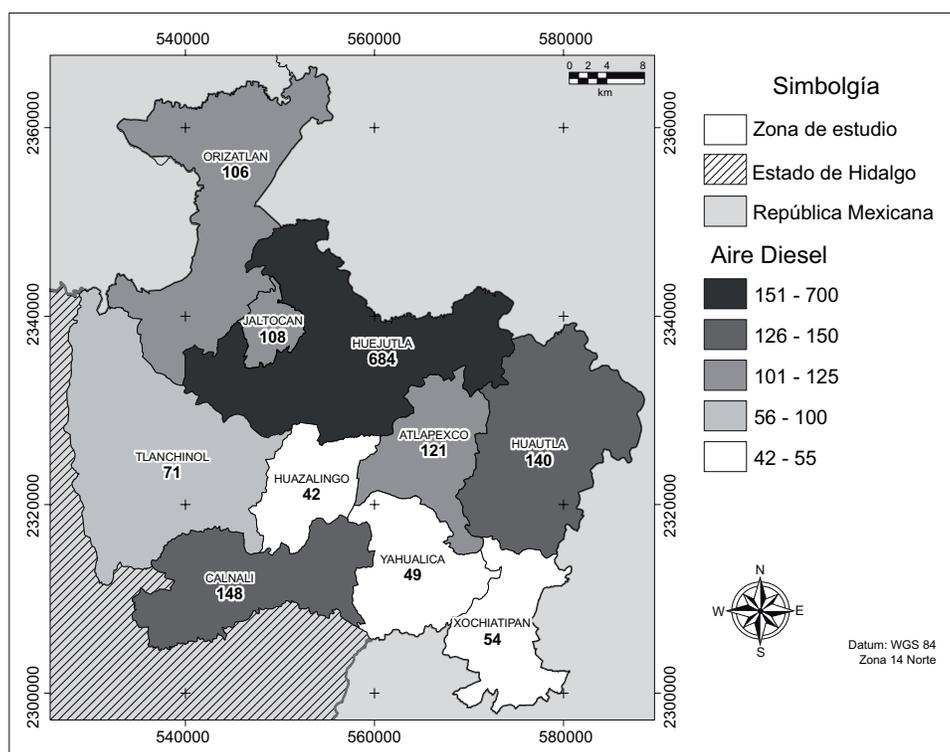


Fig. 3. Distribución por municipio de las emisiones de contaminación atmosférica por fuentes móviles en base a diesel (ton/año)

otro tipo de fuentes de contaminación atmosférica, como la quema de leña y gas en los hogares, incendios forestales y la quema de campos agrícolas para la preparación de la tierra para el ciclo de siembra. Esta una práctica muy extendida en la región y sus efectos sobre la calidad del aire de la RHH no están estudiados.

Las diferencias entre las emisiones de gasolina y diesel se explican debido a las características de la composición del combustible. Los mayores contaminantes que emite la combustión de la gasolina son CO, HC y NO<sub>x</sub> (Wark y Warner 2006). Para una gasolina, la concentración de estos contaminantes depende de una serie de factores entre los que destaca la relación estequiométrica aire-combustible en el cilindro durante la combustión. Para una combustión completa o teórica, esta relación es de 14.5:1 y determina la concentración de CO y HC en las emisiones del motor. Promover un incremento en la cantidad de aire reduce las emisiones de CO y HC pero incrementa las de NO<sub>x</sub> (los compuestos de los NO<sub>x</sub> se forman de oxígeno y nitrógeno atmosférico). Respecto de las emisiones de CO, si los automotores de la zona de estudio contarán con convertidor catalítico, estas podrían llegar a disminuirse en un rango de hasta 90 %, sin embargo aumentarían en la

misma proporción las emisiones de CO<sub>2</sub>. Asimismo las emisiones de NO<sub>x</sub> se pueden disminuir hasta en un 70 % pero se incrementarían las de NO<sub>2</sub>. Estos óxidos son precursores de lluvia ácida, por lo que es conveniente realizar un monitoreo de pérdida de cubierta vegetal por esta causa en una región en donde el tipo de vegetación es de bosque tropical perennifolio. Los factores de emisión de la técnica ERFCA están planteados para una combustión que no exceda el 0.8 % de gasolina no quemada, por lo tanto se diseñaron para mezclas pobres de combustible en la relación estequiométrica (Wark y Warner 2006). Se desconoce la situación actual del parque vehicular de la RHH. No existen registros integrales que incorporen a los vehículos nuevos, a los vehículos equipados con convertidor catalítico, al parque vehicular sin convertidor catalítico y los automotores importados de los Estados Unidos. Estas dos últimas categorías son un problema en la RHH, pues las normas oficiales mexicanas (NOM) de contaminación al aire para fuentes móviles, establecen un límite máximo permisible de CO o HC para automotores antiguos (anteriores a 1996) en relación a modelos más recientes, con lo que incentivan su uso en detrimento de la calidad del aire (SEMARNAT 1993, SEMARNAT 1999).

En el caso del diesel, la diferencia la constituye también la relación estequiométrica aire-combustible. La relación fluctúa entre 100:1 a 15:1. En la primera relación, se tiene una emisión de CO y HC aproximadamente nueve veces menor que en el caso del motor a gasolina pero con mayores emisiones de PST, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (Wark y Warner 2006). Los problemas que presentan estos motores (como son la emisión de partículas, mal olor, ruido así como la calidad del combustible que presenta concentraciones elevadas de azufre), se han ido resolviendo paulatinamente en los motores nuevos pero en la RHH el estado del parque vehicular en base a diesel no está bien estudiado, en la gran mayoría de los casos es antiguo y ya resulta obsoleto.

Respecto de la calidad del aire, en la literatura revisada (Canter y Hill 1979, SEMARNAT 1993, 1994, 1999, Canter 1998, Gómez 2003, Hernández *et al.* 2006, Wark y Warner 2006), las escalas de gravedad se refieren a niveles de emisión de contaminantes y sus unidades de medición incorporan un volumen de flujo en la salida de las cámaras de combustión de las fuentes emisoras. La técnica ER-FCA se refiere a niveles de inmisión y los resultados obtenidos se refieren a ton/año. Por ende, los valores calculados no pudieron ser referidos a los criterios de admisibilidad oficiales. Los niveles de emisiones calculados suman 12 500 ton/año. En perspectiva, estudios realizados con la misma técnica, reportan para otros municipios emisiones de 17 011 ton/año para Tulancingo; 17 647 ton/año para Mixquiahuala; 25 514 ton/año para Molango; 42 861 ton/año para Tepeji del Río; 43 348 ton/año para Pachuca; 1 957 668 ton/año para Tula-Tlaxcoapan (Cabrera *et al.* 2003, Cabrera *et al.* 2007). Se puede observar que la magnitud de los aportes contaminantes al aire en la RHH es solamente de un 0.6 % del total de las emisiones reportadas en otras zonas. Por la extensión del área de estudio (2103 km<sup>2</sup>), se obtiene una densidad de contaminación atmosférica de 6 toneladas por km<sup>2</sup>. Desde este enfoque, en la RHH la contaminación atmosférica por fuentes móviles no resulta tan importante como en el municipio de Huejutla en donde la densidad de contaminación se eleva hasta 26.3 ton/km<sup>2</sup> que sigue siendo una cantidad menor a las reportadas en otras regiones de Hidalgo. A manera de comparación, en los municipios conurbados de la capital del estado, Pachuca, con una población similar a la de la RHH, se reporta una densidad de emisión de contaminación atmosférica anual de 171 ton/km<sup>2</sup> (Cabrera *et al.* 2003). Esto se relaciona con la actividad económica de la zona de Pachuca (con la presencia de algunas

industrias del sector mineral metálico así como un parque industrial), pues la capital del estado de Hidalgo tiene 103 000 automotores registrados, contra 6,129 en la RHH así como una cantidad mayor de venta de combustible; en Pachuca existe además una población flotante no determinada que viaja diariamente al Distrito Federal. El caso más extremo es el de la región de Tula-Tepeji con 2770 ton/km<sup>2</sup> de densidad de emisiones, cantidad muy elevada que se explica por la presencia de la termoeléctrica más grande en su tipo del país (la cual opera con rangos de contaminación atmosférica muy representativos) y porque existe instalada en la zona una refinería de petróleo, dos parques industriales y empresas cementeras de importancia a nivel internacional. Si bien no hay actualmente un sistema de monitoreo de la calidad del aire en la RHH (INE 2009), esta carencia es una oportunidad para construir un sistema de monitoreo y el presente estudio aporta bases para su diseño.

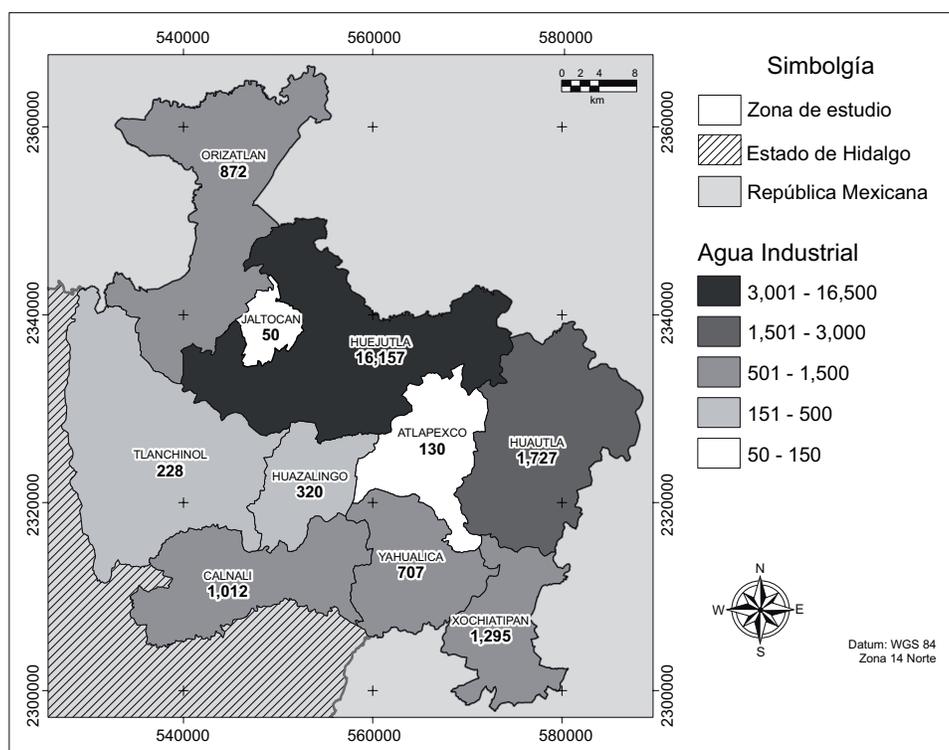
### Contaminación del agua

Los resultados obtenidos para el sector industrial se observan en el **cuadro V**, con las cantidades de contaminación generadas agrupadas por indicadores de calidad y por municipio en ton/año. También se observa el volumen de los efluentes en miles de metros cúbicos anuales (10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/año). El volumen de desecho fue de 780.2 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/año. Respecto del volumen de los efluentes industriales, el municipio con la generación más significativa fue Huejutla, seguido en menores proporciones por Huautla, Huazalingo y Xochiatipan y el resto con 3 %. El total de la contaminación emitida fue de 22 496.5 ton/año. El indicador más importante fue el de SS, seguido en menor proporción por DBO<sub>5</sub> y aceite con 1 %. Los municipios en donde se ha vertido una mayor cantidad de contaminación de origen industrial son Huejutla con las emisiones más importantes, Huautla, Xochiatipan, Calnali, San Felipe Orizatlán, Yahualica con emisiones menores y el resto con 3 % (**Fig. 4**). Los efluentes de estas fuentes no son vertidos a los sistemas de drenaje, sino directamente a los cuerpos receptores, sin ningún control. La proporción de los indicadores observados se debe a las características de las aguas residuales presentes en los corrales de engorda detectados, correspondientes a ganado bovino, porcino y caprino (sector 11), con una gran cantidad de detritos fecales. La gran cantidad de SS calculados, se explica porque las aguas de desecho de este tipo de industria se generan en la limpieza de sus instalaciones de engorda. La materia orgánica biodegradable (DBO<sub>5</sub>) se debe a residuos fecales. A

**CUADRO V. CONTAMINACIÓN PROVENIENTE DE EFLUENTES INDUSTRIALES POR MUNICIPIO**

| Municipio | Volumen de desecho* | Parámetro (ton/año) |          |        | Total (ton/año) | %     |
|-----------|---------------------|---------------------|----------|--------|-----------------|-------|
|           |                     | DBO <sub>5</sub>    | SS       | Aceite |                 |       |
| 28        | 707.2               | 2547.6              | 13 312.9 | 296.6  | 16,157.1        | 71.8  |
| 73        | 1.3                 | 26.9                | 201.1    | 0      | 228.0           | 1.0   |
| 11        | 0.4                 | 12.2                | 117.4    | 0      | 129.6           | 0.6   |
| 46        | 8.7                 | 110.9               | 761.4    | 0      | 872.3           | 3.9   |
| 25        | 17.1                | 218.4               | 1508.1   | 0      | 1,726.5         | 7.7   |
| 26        | 14.9                | 189.2               | 130.4    | 0      | 319.6           | 1.4   |
| 32        | 0.3                 | 6.4                 | 43.9     | 0      | 50.3            | 0.2   |
| 14        | 10.9                | 130.4               | 881.3    | 0      | 1,011.7         | 4.5   |
| 80        | 6.5                 | 122.2               | 584.3    | 0      | 706.5           | 3.1   |
| 78        | 12.9                | 165.1               | 1129.8   | 0      | 1,294.9         | 5.8   |
| Total     | 780.2               | 3529.3              | 18 670.6 | 296.6  | 22,496.5        | 100.0 |

DBO<sub>5</sub> = demanda bioquímica de oxígeno; DQO = demanda química de oxígeno; SS = sólidos suspendidos; \*en miles de metros cúbicos anuales (10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/a)



**Fig. 4.** Distribución por municipio de las emisiones de contaminación al agua por fuentes industriales (ton/año)

este tipo de contaminación se le debe sumar la del rastro de Huejutla que posee grandes cantidades de sangre, residuos de animales y pelo. El rastro es una de las fuentes más destacadas pues emite de manera puntual grandes cantidades de efluentes no tratados. Sin embargo, la contaminación de las industrias encontradas para la RHH es biodegradable, por lo

que se considera compatible con la generada por los efluentes domésticos y aunque representa serios problemas por emitirse en grandes cantidades en sitios específicos, puede ser tratada.

Por otro lado, los efluentes de origen doméstico consideran los desechos de una casa habitación descargadas al alcantarillado además de los efluentes de

pequeñas fábricas y talleres difíciles de considerar e identificar. Las emisiones domésticas se calcularon con base en la población con servicio de agua potable y drenaje y en la población con servicio individual como tanques sépticos o letrinas. Para los efluentes domésticos el panorama varía en función a la población y al número de personas con servicio de agua potable y drenaje. En el **cuadro VI** se observan la población por municipio y las emisiones contaminantes domésticas al agua con un total de 15 775.6 ton/año y un volumen de agua residual de 7606  $10^3\text{m}^3/\text{año}$ . En la RHH, el municipio que más contaminación vierte sobre el agua es Huejutla seguido por los demás municipios con cantidades menores proporcionales a la población con servicios (**Fig. 5**). En cuanto al volumen de efluentes se observa una relación directa con las emisiones contaminantes siendo Huejutla el municipio que contribuye nuevamente con la mitad del total y el resto de los municipios con cantidades menos significativas. De los parámetros de contaminación, el de mayor magnitud es la DQO, seguida por los SS, la  $\text{DBO}_5$  y el resto con 2 %. En la RHH no se cuenta con un servicio de drenaje ni de agua potable que abarque al 100 % de la población, existiendo grandes diferencias entre las comunidades rurales y urbanas. Mientras que en las cabeceras municipales, generalmente se cuenta con drenaje, en las áreas rurales el servicio es inexistente y la calidad de vida de la población muy baja. En las zonas con servicio, los efluentes generados son vertidos sin tratamiento de los sistemas de drenaje a los cauces receptores mientras que en las zonas rurales los pobladores también descargan sus desechos directamente sobre el sistema hídrico de la zona.

El volumen total de efluentes residuales por ambos tipos de fuentes fue de 8386.2  $10^3\text{m}^3/\text{año}$ , con los efluentes domésticos representando el 91 % del total. Sin embargo, aunque el sector industrial sólo contribuye con un porcentaje mínimo del volumen de aguas residuales, representa el 59 % de la contaminación emitida en la RHH, encontrándose pocos efluentes industriales pero muy contaminados. En la RHH, el sector de producción ganadera, es decir las grandes empresas que se dedican a la engorda de ganado bovino así como el rastro oficial, son las fuentes puntuales más importantes de contaminación al agua al no disponer de plantas de tratamiento y verter sus efluentes directamente a los cuerpos receptores. El problema de la contaminación del agua se encuentra concentrado en el municipio de Huejutla con una emisión anual de 22 646.5 ton/año, el 60 % de la contaminación total del agua en la zona. Con un programa de monitoreo y control sobre el sector de producción agropecuaria particularmente en el municipio de Huejutla de Reyes, así como con un programa de tratamiento de aguas residuales urbanas se puede solucionar en gran medida el problema de la calidad del agua, su impacto sobre los caudales receptores y el uso posterior del recurso porque en la RHH, a pesar de disponer de recursos hídricos, estos no son de la calidad suficiente (Romero *et al.* 2007, UTHH 2008).

Respecto de la calidad del agua, en el **cuadro VII** se observan las emisiones totales de los contaminantes provenientes de fuentes domésticas e industriales por indicador. Estas concentraciones se determinaron con base en las emisiones obtenidas para cada parámetro en ton/año y con base en total de los efluentes calculados en metros cúbicos anuales. Se sumaron los

**CUADRO VI.** CONTAMINACIÓN PROVENIENTE DE EFLUENTES DOMÉSTICOS POR MUNICIPIO

| Municipio | Poblacion | Volumen de desecho* | Parámetro (ton/año) |        |        |       |      | Total (ton/año) | %   |
|-----------|-----------|---------------------|---------------------|--------|--------|-------|------|-----------------|-----|
|           |           |                     | $\text{DBO}_5$      | DQO    | SS     | N     | P    |                 |     |
| 28        | 115 786   | 3496.9              | 1344.0              | 2982.6 | 2013.8 | 133.0 | 16.0 | 489.4           | 42  |
| 73        | 33 694    | 308.0               | 236.7               | 547.1  | 520.6  | 3.7   | 0.4  | 1308.5          | 8   |
| 11        | 18 769    | 272.2               | 151.8               | 348.9  | 297.0  | 7.1   | 0.9  | 805.7           | 5   |
| 46        | 38 472    | 957.4               | 393                 | 892.9  | 643.7  | 34.3  | 4.2  | 1968.1          | 12  |
| 25        | 22 521    | 477.5               | 220.9               | 504.3  | 392.1  | 15.4  | 1.9  | 1134.6          | 7   |
| 26        | 11 863    | 280.0               | 115.5               | 262.8  | 190.2  | 9.9   | 1.2  | 579.6           | 4   |
| 32        | 10 265    | 494.3               | 151.7               | 340.8  | 187.2  | 21.1  | 2.6  | 703.4           | 4   |
| 14        | 15 815    | 585.2               | 203.7               | 460.5  | 290.4  | 23.3  | 2.8  | 980.7           | 6   |
| 80        | 22 238    | 218.9               | 135.6               | 312.0  | 277.4  | 4.8   | 0.6  | 730.4           | 5   |
| 78        | 18 157    | 515.6               | 214.0               | 486.9  | 353.9  | 18.3  | 2.1  | 1075.2          | 7   |
| Total     | 307 580   | 7606.0              | 3166.9              | 7138.8 | 5166.3 | 270.9 | 32.7 | 15 775.6        | 100 |

ND = no disponible.  $\text{DBO}_5$  = demanda bioquímica de oxígeno; DQO = demanda química de oxígeno; SS = sólidos suspendidos; N = nitrógeno; P = fósforo; \*en miles de metros cúbicos anuales ( $10^3\text{m}^3/\text{a}$ )

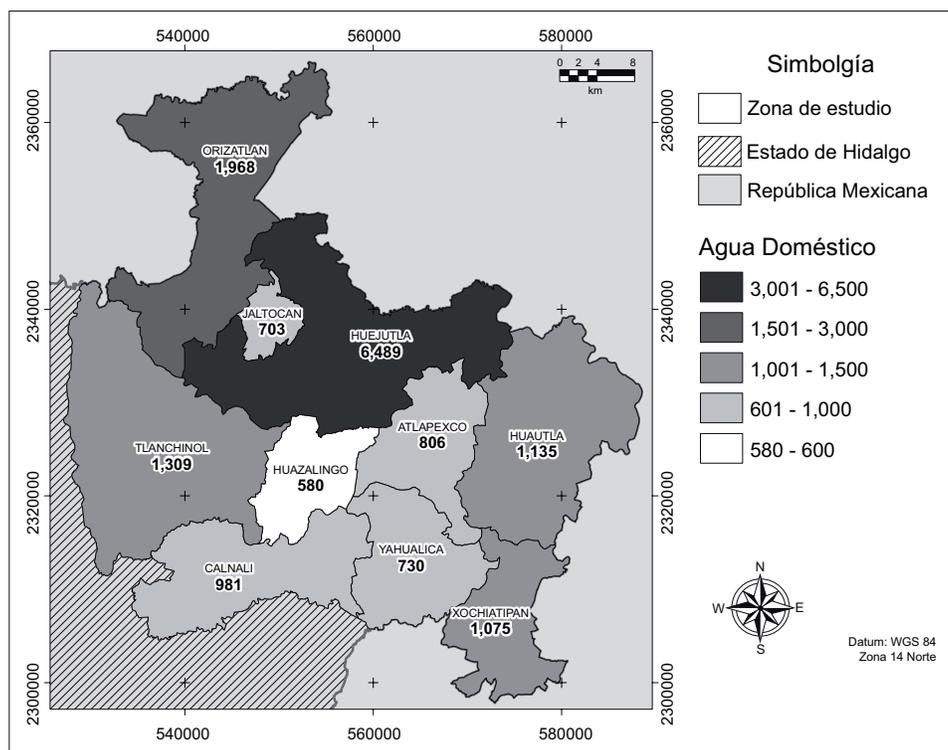


Fig. 5. Distribución por municipio de las emisiones de contaminación al agua por fuentes domésticas (ton/año)

CUADRO VII. CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL MEDIO AGUA.

| Parámetro        | Escala de importancia*  |       |        | Escala de admisibilidad oficial** | Parámetros obtenidos por municipio*** |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------------------------|-------|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | Contaminación (en mg/L) |       |        |                                   | 28                                    | 73    | 11    | 46    | 25    | 26    | 32    | 14    | 80    | 78    |
|                  | Fuerte                  | Media | Ligera |                                   |                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| SS               | 500                     | 300   | 100    | 200                               | 765.3                                 | 450.3 | 325.3 | 540.7 | 250.2 | 108.7 | 233.3 | 410.8 | 310.2 | 280.0 |
| DBO <sub>5</sub> | 300                     | 200   | 100    | 200                               | 736.5                                 | 425.3 | 601.4 | 521.6 | 570.1 | 280.0 | 319.4 | 177.9 | 243.8 | 355.3 |
| DQO              | 800                     | 450   | 160    | NC                                | 895.9                                 | 845.3 | 750.8 | 802.3 | 705.8 | 605.5 | 506.5 | 472.7 | 554.0 | 598.6 |
| Nitrógeno total  | 86                      | 50    | 25     | 60                                | 31.6                                  | 11.8  | 25.9  | 35.5  | 34.2  | 28.8  | 22.7  | 19.8  | 21.1  | 38.6  |
| Fósforo total    | 17                      | 7     | 2      | 30                                | 3.8                                   | 1.4   | 3.1   | 4.3   | 3.8   | 4.1   | 5.2   | 2.4   | 2.6   | 4.1   |
| Aceite           | 40                      | 20    | 0      | 25                                | 41.9                                  | ----  | ----  | ----  | ----  | ----  | ----  | ----  | ----  | ----  |

LMP= límite máximo permisible; NC= no considerado; \* (Hernández-Muñoz *et al.* 2001); \*\*NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1997), promedio diario; \*\*\* Valores en mg/L

efluentes de origen industrial y doméstico obteniéndose el efluente total anual para cada municipio. Para los solutos se convirtió la unidad de toneladas a miligramos. Como los datos se obtienen de manera anual, se puede calcular el resultado diario. Las emisiones en mg/L no se obtuvieron de manera experimental, son un valor de referencia y orientan a la hora de establecer la calidad del agua y posteriores programas de vigilancia. Esta situación es de especial interés en los sitios altamente contaminados por efluentes

del sector 11 y en los colectores de descarga de los sistemas de drenaje de las cabeceras municipales. Para determinar la calidad del agua, se comparó el resultado obtenido con una escala de admisibilidad oficial. Las escalas de admisibilidad son una referencia obligada en la valoración de impactos (como es el caso de la NOM-001-SEMARNAT-1996); sin embargo, tienen como dificultad el no presentar rangos de gravedad que permitan visualizar, por parte de la sociedad, la importancia del impacto producido

(Hernández *et al.* 2006). En el **cuadro VII** se aprecia una escala de gravedad (Hernández *et al.* 2001) que sirve como complemento de los criterios de valoración de la NOM. Esta escala sirve para establecer la importancia de los impactos y se refiere a tres niveles de contaminación, clasificándolos en contaminación ligera cuando la recuperación del medio es de fácil tratamiento, contaminación media cuando el cuerpo receptor ya no tiene una capacidad de autodepuración y el tratamiento del agua requiere de un sistema especializado y contaminación fuerte cuando el cuerpo receptor ya está afectado por encima del umbral aceptable y resulta imprescindible aplicarle un tratamiento. Las emisiones contaminantes se pueden comparar con los valores de la NOM para determinar su admisibilidad y con la escala de gravedad para ver su importancia. En el caso de los SS se puede observar que con excepción del municipio de Huazalingo, las emisiones en todos los municipios excedieron el límite oficial establecido por lo que su calidad es no admisible. En cuanto a su importancia, Huejutla, San Felipe Orizatlán y Xochiatipan presentaron una contaminación fuerte. Atlapexco, Yahualica, Tlanchinol y Calnali presentaron una contaminación media. Jaltocán, Huautla y Huazalingo presentaron una contaminación ligera. Para la DBO<sub>5</sub>, los niveles máximos permitidos fueron no admisibles excepto en el municipio de Calnali, en donde se determinó una contaminación ligera; Yahualica con una contaminación media y en el resto de los municipios una contaminación fuerte. La DQO no se encuentra considerada dentro de la escala de admisibilidad, siendo un punto débil de la NOM (SEMARNAT 1997), debido a que este indicador es fundamental para determinar el contenido de materia orgánica e inorgánica disuelta en el agua y la relación DBO<sub>5</sub>/DQO se utiliza para determinar la eficiencia del proceso de tratamiento. En cuanto a su importancia, todos los municipios se ubican dentro del rango de contaminación fuerte. El N total y el P total se encontraron dentro de los límites máximos, aunque con una contaminación ligera. El parámetro aceite se encontró como no admisible solamente para el municipio de Huejutla y con una contaminación fuerte.

Con base en los resultados encontrados y tomando en cuenta que sólo el N y el P pueden considerarse dentro de los límites máximos, es necesario desarrollar una infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales industriales y domésticas en las urbanas y en las zonas rurales. Los indicadores ambientales calculados en este trabajo sirven para establecer una referencia sobre el estado de los efluentes contaminantes y el tipo de tratamiento recomendado

(Hernández *et al.* 2001). Los SS se podrían reducir mediante métodos de pretratamiento como desbaste y sedimentación. Tomando la relación entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO se considera que los efluentes domésticos presentan características para ser tratados mediante métodos biológicos por ecosistema reducido. Las cantidades encontradas de aceite, N y P son admisibles pero se encuentran concentradas en el cuerpo receptor río Los Hules en el municipio de Huejutla, el cual desemboca en el río Moctezuma, que a su vez es un cauce con problemas de contaminación. La determinación del grado de eutrofización en cada cuerpo receptor es necesaria en la RHH a causa de la gran diversidad biológica que estos ríos albergan y del uso del agua que hace la población. Una de las consecuencias de las altas concentraciones de DBO<sub>5</sub>, DQO, N o P en un cuerpo de agua es la disminución de la concentración de oxígeno disuelto. Se ha observado una biodiversidad de ictiofauna y de otros organismos acuáticos que son afectados por la contaminación del agua al degradarse la calidad de sus hábitats (Ramírez *et al.* 2004). Se han reportado estudios que han encontrado que en condiciones naturales, a menor concentración de oxígeno disuelto (OD) disminuye la riqueza de especies nativas de peces como el topote del Atlántico (*Poecilia mexicana*); el guatopote listado (*Heterandria jonesi*); la sardinita mexicana (*Astyanax mexicanus*), la trucha de tierra caliente (*Agnostomus monticola*); la carpa veracruzana (*Dionda ipni*); el pez gato (*Ictalurus sp.*), el tiro (*Goodea sp.*) y la mojarra huasteca (*Herrichthys sp.*) mediante un análisis de correspondencia canónica (Miranda *et al.* 2008). Una concentración baja de OD en un cuerpo de agua se puede dar por varios factores, pero la concentración elevada de materia orgánica biodegradable en el agua, es una de las condiciones determinantes. Se necesitan estudios de factibilidad para diseñar, construir y operar de manera eficiente una red de plantas tratadoras de agua en la RHH. Actualmente no existen reportes integrales sobre calidad del agua para la RHH, sólo se mencionan algunos puntos de muestreo y datos del mes de septiembre de 2008 (INE 2009). En este caso existe la necesidad de integrar los resultados de vigilancia de calidad del agua de instancias del gobierno federal como la Comisión Nacional del Agua, con instancias del gobierno estatal como la Comisión Estatal del Agua.

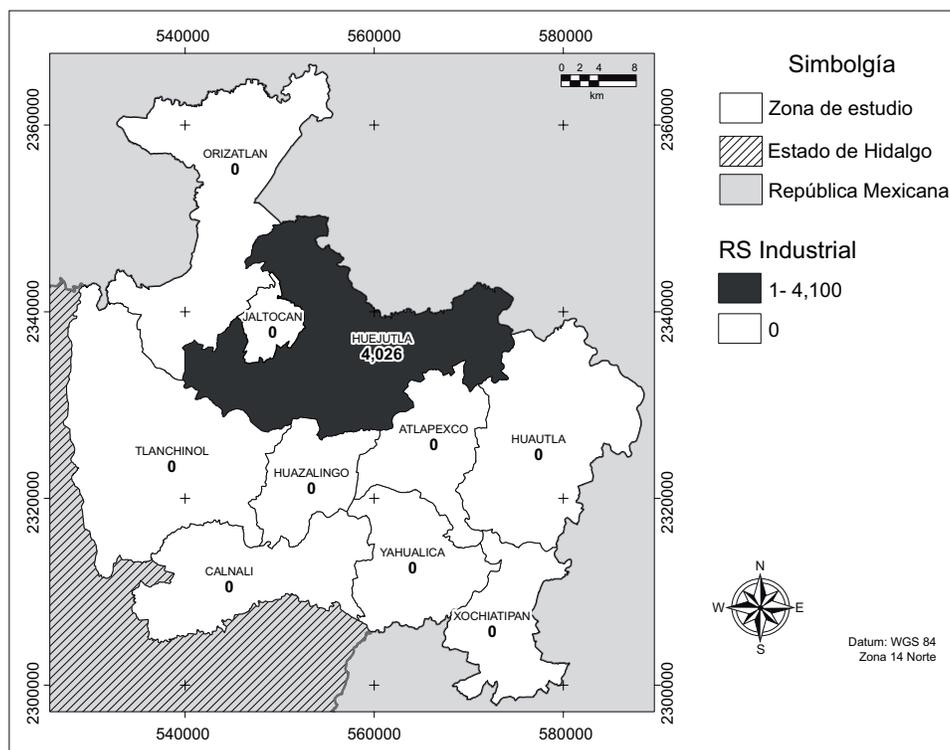
En la RHH se emitieron 22 496.5 ton/año de contaminantes provenientes del sector agropecuario, en relación a estudios previamente reportados en Hidalgo, se reportan 35 282 ton/año de contaminantes industriales en Tula-Tlaxcoapan, 17 414 en Tulancingo,

4105 en Tepeji del Río, 3489 en Santiago Tulantepec, 2727 ton/año en Tizayuca y 2072 ton/año en Pachuca y cantidades menores en otros municipios (Cabrera *et al.* 2003). Sobre esta comparación, la cantidad emitida en la RHH es la segunda en magnitud y sus efluentes son predominantemente materia orgánica biodegradable mientras que en los estudios previos, el sector agropecuario no fue considerado y los efluentes industriales provienen de distintos sectores industriales como el químico en Tula, el textil en Tulancingo, Santiago y Tepeji, y mixto en Pachuca y Tizayuca. Estos efluentes están compuestos por una naturaleza distinta a los detectados en la RHH, por lo que sólo se pueden comparar en cuanto a su magnitud, mas no existe comparación en cuanto a la calidad de los efluentes. Respecto a los efluentes domésticos, en los estudios reportados previamente, se emitieron 51 303 ton/año en 14 municipios del estado de Hidalgo por una población de 587 000 habitantes con una mayor cantidad de servicios de drenaje (Cabrera *et al.* 2003). Para la RHH, se emitieron 15 775.60 ton/año generados por 307 580 habitantes. La generación de aguas residuales domésticas presenta una correlación entre el número de población con servicio de agua potable y drenaje y la generación de caudales de aguas residuales. En la RHH sólo el 50 % de la po-

blación tiene acceso a estos servicios, mientras que la población restante se encuentra en localidades rurales y desechan sus efluentes directamente en los cuerpos receptores con una gran dificultad para implementar medidas de tratamiento de aguas residuales, de ahí la diferencia tan significativa en la cantidad de contaminación generada. Se han hecho estudios en la subcuenca hidrológica del río Moctezuma en donde se propone la implementación de alternativas tecnológicas para este segmento de la población como pueden ser cosecha del agua de lluvia, biofiltros, baños secos o humedales artificiales promoviendo la participación comunitaria y programas de educación ambiental (Romero *et al.* 2007).

**Contaminación del suelo por residuos sólidos**

Se tomaron en cuenta dos tipos de fuentes contaminantes, las industriales y las domésticas. En el caso de la RHH, se encontraron como fuentes emisoras industriales al sector de producción de alimentos (**Cuadro II**), básicamente un rastro ubicado en el municipio de Huejutla (**Fig. 6**), que genera residuos sólidos como se observa en el **cuadro VIII**. Las emisiones fueron por un total de 4025.6 ton/año de desechos propios de la operación de un rastro. La gran mayoría correspondió a sangre, vísceras, pezu-



**Fig. 6.** Distribución por municipio de las emisiones de contaminación al suelo por fuentes industriales (ton/año)

ñas y otros restos no aprovechados de los animales sacrificados. Lo restante a la categoría de animales y órganos afectados. Los residuos sólidos generados en el matadero se vierten sin ningún control directamente en el sitio de disposición final. Estos desechos no reciben ningún tratamiento, razón para ser confinados en un espacio controlado o incinerados; también podrían ser utilizados como sustrato para realizar una biodegradación anaerobia. El biogás producido en la etapa metanogénica se podría aprovechar para producir energía eléctrica para consumo del propio rastro.

**CUADRO VIII. RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS POR EL SECTOR INDUSTRIAL**

| Municipio | Sector 31 | Residuo sólido (ton/año) | Naturaleza del desecho          | %     |
|-----------|-----------|--------------------------|---------------------------------|-------|
| 28        | Matadero  | 3707.8                   | Sangre, vísceras, pezuñas ,etc. | 92.0  |
|           |           | 317.8                    | Animales y órganos infectados   | 8.0   |
|           | Total     | 4025.6                   |                                 | 100.0 |

Los residuos sólidos de origen doméstico incluyen desechos provenientes de casas habitación de todo tipo, comercios, oficinas, edificios y lugares públicos. En el **cuadro IX** se observan los resultados de generación obtenidos en función de los indicadores ambientales considerados por la técnica ERFCA y se calcularon de acuerdo a la población de cada municipio y nivel de vida, dividiéndola en población urbana y rural. Las localidades menores a 2500 habitantes

se consideran rurales (INEGI 2007). En la RHH, las áreas urbanas sólo se limitan a las cabeceras municipales. El indicador ambiental empleado con base en el número de habitantes, fue el de un área típica de una nación en desarrollo que es de 850 g/hab/día. El resto de la población se encuentra distribuida de manera heterogénea en comunidades rurales. El indicador empleado en este caso fue para áreas con ingresos muy bajos y es de 435 g/hab/día. El total de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en la RHH fue de 62,121.3 ton/año. Una mitad de los RSU proviene de la población urbana y la otra de la población rural. La generación total de RSU por municipio se concentra en tres municipios, Huejutla el más significativo, seguido por San Felipe Orizatlán y Tlanchinol, con el resto generando el 36.2 % (**Fig. 7**). En cuanto a la población urbana, las localidades en donde se generan más RSU son las cabeceras municipales de Huejutla, San Felipe Orizatlán, Jaltocán y el resto con el 25 %. Siendo que la población urbana solamente representa la cuarta parte del total, el problema de los RSU en la RHH se concentra en las cabeceras municipales. La generación de RSU en localidades rurales se encuentra más representada en el municipio de Huejutla mientras que en el resto de los municipios las cantidades se distribuyen de manera proporcional a su población rural observándose que la dispersión territorial de estos pobladores representa un reto importante al manejo de los residuos sólidos en la zona. El problema de los RSU en la RHH se concentra en el municipio de Huejutla, en donde ni siquiera se dispone de un relleno sanitario en operación, por lo que los RSU se depositan en sitios no controlados o bien se queman. Actualmente se analiza

**CUADRO IX. RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS POR POBLACIÓN URBANA Y RURAL**

| Municipio | Total de habitantes <sup>1</sup> | Población urbana <sup>1</sup> | Generación de residuos por población urbana (ton/año) | %     | Población rural <sup>1</sup> | Generación de residuos por población rural (ton/año) | %     | Total (ton/año) | % Total |
|-----------|----------------------------------|-------------------------------|---|-------|------------------------------|--|-------|-----------------|---------|
| 28        | 115 786                          | 45 833                        | 14 219.7  | 52.3  | 69 953                       | 11 106.8   | 31.9  | 25 326.5        | 40.8    |
| 73        | 33 694                           | 4580                          | 1421.0  | 5.2   | 29 114                       | 4622.6   | 13.2  | 6043.6          | 9.7     |
| 11        | 18 769                           | 1971                          | 611.5   | 2.3   | 16 798                       | 2667.1   | 7.6   | 3278.6          | 5.3     |
| 46        | 38 472                           | 14 171                        | 4396.6  | 16.2  | 24 301                       | 3858.4   | 11.1  | 8255.0          | 13.2    |
| 25        | 22 521                           | 3541                          | 1098.6  | 4.0   | 18 980                       | 3013.6   | 8.6   | 4112.2          | 6.6     |
| 26        | 11 863                           | 664                           | 206.0   | 0.8   | 11 199                       | 1778.1   | 5.1   | 1984.1          | 3.2     |
| 32        | 10 265                           | 5393                          | 1673.2  | 6.2   | 4872                         | 773.6  | 2.2   | 2446.8          | 3.9     |
| 14        | 15 815                           | 6175                          | 1915.8  | 7.0   | 9640                         | 1530.6   | 4.4   | 3446.4          | 5.6     |
| 80        | 22 238                           | 3942                          | 1223.0  | 4.5   | 18 296                       | 2905.0   | 8.3   | 4128.0          | 6.7     |
| 78        | 18 157                           | 1434                          | 444.9   | 1.5   | 16 723                       | 2655.2   | 7.6   | 3100.1          | 5.0     |
| Total     | 307 580                          | 87704                         | 27 210.3  | 100.0 | 219 876                      | 34 911.0   | 100.0 | 62 121.3        | 100.0   |

<sup>1</sup> fuente: INEGI 2007

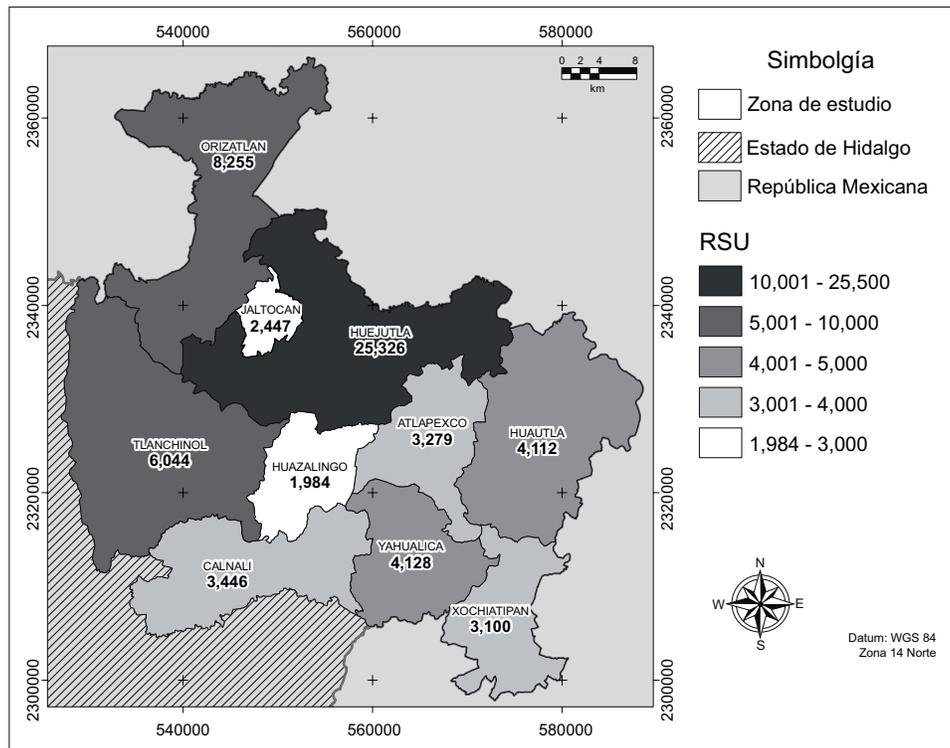


Fig. 7. Distribución por municipio de las emisiones de contaminación al suelo por RSU (ton/año)

la construcción de rellenos sanitarios regionales en Huejutla, Atlapexco, Huautla, Yahualica y Jaltocán pero sin resultados concretos. El manejo integral y la minimización de residuos en Huejutla coadyuvaría de manera prioritaria a la resolución de la problemática ambiental en la RHH.

Se observó que en la RHH los RSU generados en las cabeceras municipales reciben un manejo diferente al de los de origen rural. En las cabeceras municipales se cuenta con un manejo tradicional que enfoca su trabajo en la recolección y la disposición final de los residuos de acuerdo con el artículo 115 Constitucional (DOF 1917) y con la Ley Orgánica Municipal (Gobierno del Estado de Hidalgo 2001). Sin embargo, a pesar del decreto que promulgó la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos (SEMARNAT 2003), la gestión de los RSU en la RHH carece de los fundamentos institucionales para cumplir cabalmente con lo dispuesto en las leyes mexicanas. En el **cuadro X** se puede apreciar un resumen de las características del manejo de RSU en la zona de estudio de acuerdo a los servicios de recolección de basura de los municipios. La población atendida se limita a las cabeceras municipales y sus alrededores, la eficiencia en la recolección no sobrepasa el 80 %. Los sistemas de recolección cuentan con servicio en las cabeceras municipales y en aquellas comunidades

que se encuentren dentro de un perímetro no mayor a 5 km. El número de rutas de recolección es limitado por lo que ésta se lleva a cabo de manera semanal. El número de unidades recolectoras es escaso y no están acondicionadas para realizar un almacenamiento por separado, son unidades cuya vida útil ya se ha alcanzado y por lo tanto su operación resulta cara e ineficiente. El número de empleados es muy bajo de acuerdo a la densidad poblacional. Los trabajadores no se encuentran capacitados para realizar sus tareas, no cuentan con seguridad e higiene dentro de sus condiciones laborales y sus percepciones se encuentran por debajo del salario mínimo vigente en México, como se pudo constatar en la visita a cada municipio y por datos proporcionados por los servicios municipales de recolección de basura. Los RSU generados en zonas rurales no tienen un sistema de manejo de ningún tipo. En algunos municipios como en Atlapexco se promueve el enterramiento de los desechos, pero son acciones esporádicas que carecen de programas municipales de manejo. Si bien algunas fracciones de los RSU emitidos en localidades rurales son aprovechados por la población, la mayor parte tiene dos destinos: son depositados en sitios no controlados clandestinos o incinerados al aire libre; para ambos casos se desconoce la magnitud de los impactos producidos.

**CUADRO X. CARACTERÍSTICAS DE MANEJO DE RSU POR MUNICIPIO**

| Municipio | No de rutas | No de camiones | No de empleados | Residuos recolectados según servicio de limpia (ton/día) | % Población atendida | Sitio de disposición final |
|-----------|-------------|----------------|-----------------|--|----------------------|----------------------------|
| 28        | 10          | 7              | 23              | 40   | 34.9                 | Sitio no controlado        |
| 73        | 6           | 1              | 6               | 4  | 13.5                 | Sitio no controlado        |
| 11        | 1           | 1              | 10              | 1  | 9.3                  | Sitio no controlado        |
| 46        | 3           | 3              | 15              | 2  | 36.1                 | Sitio no controlado        |
| 25        | 2           | 2              | 10              | 2  | 14.1                 | Sitio no controlado        |
| 26        | 2           | 1              | 13              | 1.5  | 7.2                  | Sitio no controlado        |
| 32        | 3           | 1              | 7               | 1  | 100.0                | Sitio no controlado        |
| 14        | 2           | 1              | 6               | 1.5  | 19.1                 | Sitio no controlado        |
| 80        | 3           | 1              | 8               | 1  | 7.2                  | Sitio no controlado        |
| 78        | 3           | 1              | 7               | 1  | 8.4                  | Sitio no controlado        |

Fuente: encuesta a las Presidencias Municipales.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) reporta para Hidalgo en 2008, una generación estimada de 624 150 ton/año, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) así como el Gobierno del Estado de Hidalgo basan sus estimaciones de generación en los informes de la SEDESOL. En relación con estudios previos de generación de RSU en el estado, se reporta una generación de 197 216 ton/año por una población de 788 824 habitantes, para 14 municipios de Hidalgo (Cabrera *et al.* 2003). El estudio reportado incluyó a municipios como Pachuca, Tulancingo y Tula, de los más poblados del estado y con un mayor porcentaje de población urbana. Por otro lado, la generación *per cápita* de residuos se ha ido incrementando en aproximadamente 250 g/hab desde que se realizó el estudio reportado (Cabrera *et al.* 2003) hasta la fecha (SEMARNAT 2009), por lo que se tendría que determinar cuál es la generación actual. En el presente trabajo se obtuvo una generación de 62 121 ton/año en la RHH, por una población de 307 580 personas. Por la cantidad de población en la RHH, se esperaría una mayor cantidad de RSU, sin embargo la mayor parte de sus habitantes viven en localidades rurales, con un bajo nivel de ingresos económicos y por ende una baja producción de residuos.

Los sitios de disposición final (SDF) son en todos los municipios sitios sin políticas establecidas de revisión, lo que origina impactos adversos de malos olores, riesgos sanitarios, aparición de fauna nociva, degradación de la estética paisajística, contaminación de los mantos freáticos, depreciación del valor catastral de los predios utilizados con este fin y una reducción general de su calidad ambiental. Es importante mencionar que estos SDF utilizados por las autoridades municipales, son los sitios que se podrían denominar oficiales para disponer de los RSU. También existen

SDF no oficiales o clandestinos, sin que se tenga un registro oficial de ellos. La normatividad mexicana maneja una serie de parámetros para la disposición final de los RSU. La NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2004) establece los criterios para seleccionar la ubicación de un relleno sanitario, los estudios que deben comprender su evaluación de impacto ambiental, la disposición de los RSU y el manejo del relleno. Se observó que los municipios de Huejutla, Atlapexco, Jaltocán y Yahualica llevan a cabo aprovechamiento de los residuos que consisten en la recolección de polietilentereftalato (PET) para su posterior traslado a puntos de compra. No reportan cantidades de aprovechamiento. Huejutla y Atlapexco cuentan con un área de emergencia para disponer sus residuos cuando el clima no permite mandarlos al frente de trabajo. Huejutla, Atlapexco, Jaltocán y Yahualica son los únicos municipios que disponen de un frente de trabajo para su operación. Estos mismos municipios reportan tratamiento a los residuos que llegan a los vertederos, pero se refieren a las prácticas de recolección de PET. Los SDF de la zona de estudio presentan severas deficiencias ya que ninguno cuenta con monitoreo de los gases generados, interfase que prevenga que los lixiviados generados migren hacia el subsuelo e incluso manuales de operación o medidas de control del sitio. En los municipios de la zona de estudio se determinó que todos los SDF se encuentran dentro de la categoría de sitios no controlados, pues no cumplen con lo dispuesto por la NOM por lo que su calidad es no admisible. Respecto de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, en su Título Sexto hace referencia al manejo de los RSU, y establece los lineamientos para determinar planes de manejo y las prohibiciones que pueden realizar los municipios como son verter residuos en zonas baldías, cuerpos de agua, vía pública, incineración de residuos

a cielo abierto y abrir nuevos basureros a cielo abierto (SEMARNAT 2004). Estas acciones son cotidianas en todos los municipios que integran la RHH, el problema se encuentra muy agudizado en los municipios con mayor población y se observa que básicamente no tienen las condiciones para cumplir con la normatividad mexicana respectiva. Respecto de la calidad del suelo, el problema de la generación y vertido de los RSU no se puede visualizar con indicadores de niveles máximos permisibles de contaminación como en el caso de aire y agua debido a que la estructura de la NOM se encuentra construida en función a sistemas de manejo. El presente trabajo contribuye al estado del conocimiento de los residuos sólidos y puede servir como una base para el diseño de un plan de manejo de RSU a nivel de municipio y de la RHH.

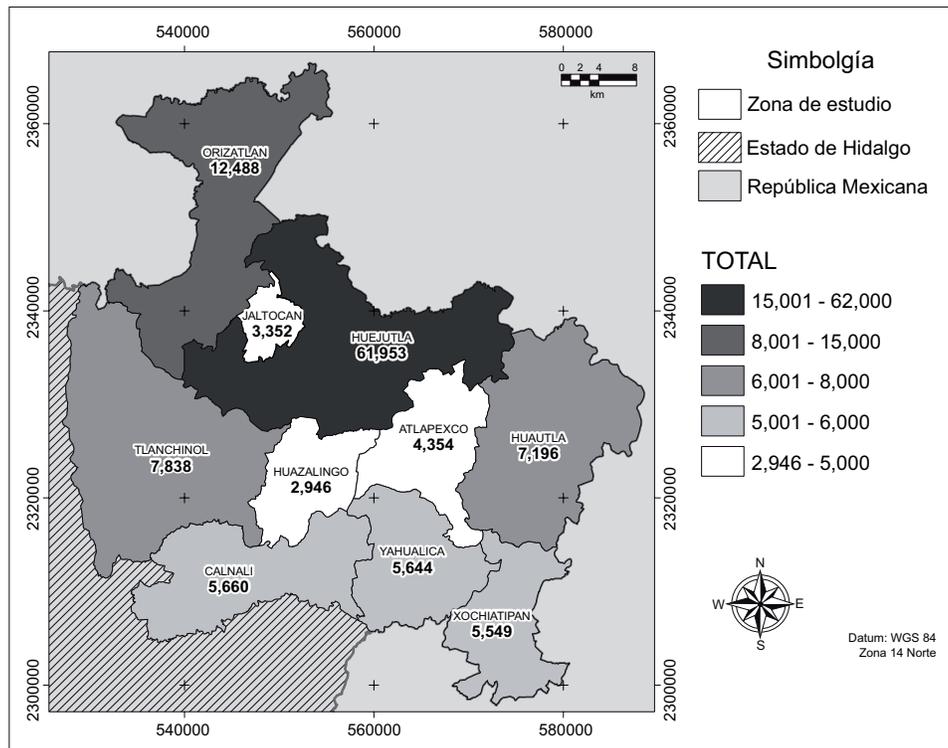
## CONCLUSIONES

Con la técnica ERFCA se construyó una base de datos de emisiones contaminantes al aire, agua y suelo, se identificaron las fuentes de emisión, las clases de contaminantes y las cargas de estos, lo que permitió jerarquizar la problemática ambiental en la zona de estudio. En cuanto a la magnitud de la contaminación emitida, el total de las emisiones fue de 116 979.5 ton/año, distribuyéndose como se resume en el **cuadro XI**. Por tipo de medio, el suelo fue el más impactado con una cantidad de 66 146.9 ton/año que representa el 57 % del total de las emisiones contaminantes. Después se encontró el agua con 38 272.1 ton/año y el 32 % del total. Por último, al aire se emitieron 12 560.5 ton/año, con el 10 % de la contaminación. Por municipio, quien presenta la mayor magnitud de generación de contaminación es Huejutla con el 53 %

del total, lo sigue San Felipe Orizatlán con 11 %, Tlanchinol con 7 %, y los demás municipios con cantidades menos significativas (**Fig. 8**). Con los datos obtenidos se pueden establecer las prioridades para la prevención y corrección de las afectaciones de la contaminación en la RHH por municipio en un plan de manejo ambiental regional. Huejutla de Reyes es el municipio prioritario y la contaminación por residuos sólidos urbanos y la contaminación de sus cuerpos receptores de aguas residuales, los problemas más relevantes por resolver. San Felipe Orizatlán sería el otro municipio prioritario concentrando su problemática en el manejo de sus RSU que le representa dos terceras partes de sus emisiones. En cuanto a la importancia de la contaminación emitida, se realizó la valoración de la calidad ambiental de cada medio. Para el aire, las emisiones son menores en relación a lo reportado para otras zonas de Hidalgo y el problema, al menos por fuentes de contaminación móviles no es el más relevante. No fue posible establecer una escala de admisibilidad oficial ni una escala de gravedad, así que se optó por una comparación de densidad de emisión de contaminantes por km<sup>2</sup>. Para el agua, se determinó que los niveles máximos permisibles de los indicadores analizados no son admisibles para la NOM-001-SEMARNAT-1996 y en general la gravedad de la contaminación emitida se considera de media a fuerte. Para el suelo, el manejo de los RSU y en particular su disposición final, no es admisible en cuanto a la NOM-083-SEMARNAT-2003 y a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Tanto la construcción de la base de datos como la jerarquización de la problemática ambiental son contribuciones al conocimiento de la situación actual de la RHH. La presente investigación es la primera en su género, por lo que se establece un precedente de referencia para

**CUADRO XI.** RESUMEN DE EMISIONES CONTAMINANTES POR MUNICIPIO Y TIPO DE FUENTE EN ton/año

| Clave | Municipio               | Suelo    |            | Agua      |            | Aire    |          | Total<br>(ton/año) | %   |
|-------|-------------------------|----------|------------|-----------|------------|---------|----------|--------------------|-----|
|       |                         | RSU      | Industrial | Doméstico | Industrial | Diesel  | Gasolina |                    |     |
| 28    | Huejutla                | 25,326.5 | 4,025.6    | 6,489.4   | 16,157.1   | 683.7   | 9,270.6  | 61,952.9           | 53  |
| 73    | Tlanchinol              | 6,043.6  | 0.0        | 1,308.5   | 228.0      | 70.5    | 187.4    | 7,838.0            | 7   |
| 11    | Atlapexco               | 3,278.6  | 0.0        | 805.7     | 129.6      | 121.3   | 18.4     | 4,353.6            | 4   |
| 46    | San Felipe<br>Orizatlán | 8,255.0  | 0.0        | 1,968.1   | 872.3      | 106.0   | 1,286.6  | 12,488.0           | 11  |
| 25    | Huautla                 | 4,112.2  | 0.0        | 1,134.6   | 1,726.5    | 139.7   | 82.8     | 7,195.8            | 6   |
| 26    | Huazalingo              | 1,984.1  | 0.0        | 579.6     | 319.6      | 41.9    | 20.3     | 2,945.2            | 3   |
| 32    | Jaltocán                | 2,446.8  | 0.0        | 703.4     | 50.3       | 108.1   | 43.7     | 3,352.3            | 3   |
| 14    | Calnali                 | 3,446.4  | 0.0        | 980.7     | 1,011.7    | 147.7   | 73.9     | 5,660.4            | 5   |
| 80    | Yahualica               | 4,128.0  | 0.0        | 730.4     | 706.5      | 48.8    | 30.8     | 5,644.5            | 4   |
| 78    | Xochiatipan             | 3,100.1  | 0.0        | 1,075.2   | 1,294.9    | 53.8    | 24.8     | 5,548.8            | 4   |
|       | Total                   | 62,121.3 | 4,025.6    | 15,775.6  | 22,496.5   | 1,521.2 | 11,039.3 | 116,979.5          | 100 |



**Fig. 8.** Distribución por municipio de las emisiones de contaminación en aire, agua y suelo en la región de la Huasteca Hidalguense (ton/año)

próximas investigaciones sobre la calidad ambiental de la región. El método ERFCa genera una confiabilidad en los datos determinados que son una contribución al campo de la contaminación ambiental en la RHH desde una visión química. Sin embargo, no se deben perder de vista las fortalezas y debilidades propias de un inventario rápido de contaminantes, por lo que se deben tomar como una referencia y se deben realizar estudios interdisciplinarios que los complementen. Estos trabajos podrán emplear la técnica utilizada en el presente análisis o bien otros métodos de generación de inventarios contaminantes y de impacto ambiental que convaliden los resultados obtenidos. Dentro de las perspectivas obtenidas en el presente trabajo, se incluyen profundizar en los problemas detectados que requieren de estudios puntuales donde participe la sociedad, como son implementar esquemas de manejo integral de RSU; depuración y reuso de aguas residuales, incluyendo el aprovechamiento de los biosólidos generados; operación de los centros de verificación del parque vehicular y el impacto ecológico de la construcción de nuevas vías de comunicación. También realizar estudios del impacto sobre la biodiversidad del manejo actual de la contaminación, en particular aquellos que realicen inventarios bióticos y correlacionen la contaminación emitida con las afectaciones a la

biodiversidad de la RHH. Estos temas de investigación se vuelven más complejos al integrar diferentes elementos, actores, espacios y tiempos, lo que se traduce finalmente en poder generar políticas y programas de control y educación ambiental, gestión ambiental, planes de manejo de residuos, cursos de capacitación y formación, y toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la UAEH, presidencias municipales, INEGI, CNA, Pemex, CANACINTRA, COPARMEX, empresas, asociaciones y personas que hicieron posible la realización del presente proyecto.

## REFERENCIAS

Arriaga L., Aguilar V. y Alcocer J. (2002). *Agua continentales y diversidad biológica de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. <http://www.conabio.gob.mx> 08/10/2009.

- Arriaga L., Espinoza J.M., Aguilar C., Martínez E., Gómez L. y Loa E. (Coordinadores). (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Escala de trabajo 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. <http://www.conabio.gob.mx> 08/10/2009.
- Benítez H., Arizmendi C. y Márquez L. (1999). *Base de datos de las AICAS*. CIPAMEX, CONABIO, FMCN, y CCA. <http://www.conabio.gob.mx> 08/10/2009.
- Cabrera R., Gordillo A., Salvador R. (2007). Estudio de la calidad ambiental en Molango de Escamilla, en el estado de Hidalgo, México. Memorias. VI Congreso Internacional XII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Chihuahua. Academia Nacional de Ciencias Ambientales A.C. Chihuahua, Chih. México Junio 6,7, y 8 de 2007. CD-ROM.
- Cabrera R., Gordillo A. y Cerón A. (2004). Inventario de residuos peligrosos industriales en 17 municipios del estado de Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 20, 13-22.
- Cabrera R., Gordillo A. y Cerón A. (2003). Inventario de contaminación emitida a suelo, agua y aire en 14 municipios del estado de Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 19, 171-181.
- CANACINTRA (2005). *Directorio de empresas afiliadas*. Cámara Nacional de Industria de la Transformación. Hidalgo, Delegación Pachuca, 30 p.
- Canter L. W. (1998). *Manual de evaluación de impacto ambiental*. McGraw-Hill, Santafé de Bogotá, 841 pp.
- Canter L. W. y Hill L.G. (1979). *Handbook of variables for environmental impact assessment*. Ann Arbor Science, Ann Arbor, 201 p.
- Cervantes A., Ramírez S. y Ramírez N. (2002). Mamíferos pequeños de los alrededores del poblado de Tlanchinol. *Serie Zoológica* 73, 225-237.
- Challenger A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología, UNAM, y Agrupación Sierra Madre, México D.F., 847 p.
- COEDE (2005). *Programa institucional de desarrollo sustentable y sostenido 2005 - 2011*. Consejo Estatal de Ecología. Secretaría de Obras Públicas, Comunicaciones, Transportes y Asentamientos. Gobierno del estado de Hidalgo, Pachuca, 23 p.
- COESPO (2009). *Boletín informativo 09/09*. Consejo Estatal de Población del estado de Hidalgo, Pachuca, 2 p.
- COPARMEX (2005). *Directorio de empresas afiliadas*. Confederación Patronal de la República Mexicana. Hidalgo, Delegación, Pachuca, 25 p.
- DOF (1917). Diario Oficial de la Federación. 5 de febrero de 1917. Última reforma publicada 24 de agosto de 2009.
- Doménech X. (2000). *Química ambiental. El impacto ambiental de los residuos*. 5. Miraguano Ediciones, Madrid, 254 p.
- García M. y San Agustín L. (1994). Impacto ambiental. Evaluación de la contaminación ambiental en los municipios de Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma en tres diferentes planos: agua, aire y suelo. Tesis de Licenciatura. Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México, 104 p.
- Gobierno del Estado de Hidalgo (2001). Decreto Num. 213. Ley Orgánica Municipal del Estado de Hidalgo. Poder Ejecutivo Estatal. Periódico Oficial del Estado de Hidalgo. 16 de abril de 2001. Última reforma publicada en el Periódico Oficial el 10 de marzo de 2008.
- Gómez D. (2003). *Evaluación del impacto ambiental*. 2a. MundiPrensa, Madrid, 749 p.
- Hernández A., Hernández P. y Gordillo A. (2006). *Manual para la evaluación de impactos ambientales*. INNCIVE Ediciones, Madrid, 770 p.
- Hernández A., Hernández A. y Galán P. (2001). *Manual de depuración URALITA*. Paraninfo-Thomson Learning, Madrid, 429 p.
- INE (2009). Retos Ambientales por Distrito Electoral. Instituto Nacional de Ecología. <http://dgipea.ine.gob.mx/rade/index.php> 08/11/2009.
- INE (2008). Campaña de monitoreo de calidad del aire en la región Tula-Tepeji-Zumpango. Resumen Ejecutivo. INE-SEMARNAT, México D.F., 3 p.
- INE (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Western Governors' Association, México D.F., 508 p.
- INE (1997). *Registro de emisiones y transferencia de Contaminantes. Propuesta Ejecutiva Nacional*. México. INE-SEMARNAP, en cooperación con el Instituto de las Naciones Unidas para la Capacitación e Investigación, México D.F., 162 p.
- INEGI (1997a). *Síntesis geográfica del estado de Hidalgo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., Ags., México, 134 pp.
- INEGI (1997b). *División territorial del estado de Hidalgo de 1810 a 1995*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., Ags., México, 201 p.
- INEGI (1998). Cartas de climas para el estado de Hidalgo, 1:1000 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2007). *Anuario estadístico del estado de Hidalgo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Ags. Ags., 713 p.
- INEGI (2008). *Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica*. 2a ed. Instituto Nacional

- de Estadística, Geografía e Informática. A.G.S. A.G.S., México, 84 p.
- Luna I. y Alcántara O. (2004). Florística del bosque mesófilo de montaña de Hidalgo. En: *Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental* (I. Luna, J. J. Morrone y D. Espinosa, Eds.). CONABIO-UNAM, México, D.F., pp. 169-192.
- Luna I., Ocegueda S. y Alcántara O. (1994). Florística y notas biogeográficas del bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Anales del Instituto de Biología, UNAM, Serie Botánica*. 65, 31-62.
- Martínez M.A., Ortiz R., de la Barreda B., Zuria I.L., Bravo J. y Valencia J. (2007). Hidalgo. En: *Avifaunas estatales de México* (R. Ortiz, A. Navarro, H. Gómez, O. Rojas y T. Peterson, Eds.). CIPAMEX, Pachuca, pp. 85-95.
- Miranda R., Galicia D., Vilches A., Bautista-Hernández C. E., Monks S., Pulido-Flores G., Gaspar S., Leunda P. M. (2008). Fish community structure in relation to environmental factor on the Barranca de Metztitlán, Biosphera reserve (Hidalgo, México). *Memorias. Cuadragésimo Congreso Anual del Consejo de Peces del Desierto. 40th Annual Meeting of the Desert Fishes Council.*, Cuatro Ciénegas, Coahuila, México 12 a 16 de Noviembre. CD-ROM.
- Moreno C.E. y Sánchez G. (2002). Diversidad de mamíferos del estado de Hidalgo: ¿Qué tanto conocemos? *Memorias. VI Congreso Nacional de Mastozoología*. 21-25 de Octubre. Oaxaca, México. CD-ROM.
- Ortega F. y Castillo G. (1996). El bosque mesófilo de montaña y su importancia forestal *Ciencias*. 43, 32-39.
- Puig H. (1976). *Végétation de la Huasteca, Mexique*. Mission archeologique et ethnologique française au mexique. CNRS, México, 531 p.
- Ramírez A, León R., Valencia A., Ortíz R. y Acevedo O. (2004). Estado actual de algunos anfibios y reptiles del estado de Hidalgo, basado en la NOM-059-ECOL-2001. *Memorias. VIII Reunión Nacional de Herpetología*. 8-11 de noviembre. México, D.F., CD-ROM.
- Romero R., Soares D., Chávez Y., Camacho H. (2007). El agua en la Huasteca Hidalguense. Problemática y perspectivas para su manejo sustentable. *Gaceta del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Versión electrónica. No.8 Diciembre del 2007. <http://www.imta.gob.mx/gaceta/antiores/g08-12-2007/huasteca-hidalguense.html> 02/11/2009.
- Rzedowski J. (1998). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. En: *Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución* (T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa, Eds.). Instituto de Biología. UNAM, México D.F., pp. 129-145.
- Rzedowski J. (1983). *Vegetación de México*. Limusa, México D.F., 432 p.
- Schimmel C. y Griffen D. (1976). *Treatment and disposal of complex industrial wastes*. USEPA (EPA-600/2-76-123), Washington, D.C.
- SEMARNAT (1988). Decreto que expide la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 28 de enero de 1988. Última reforma 05 de julio de 2007.
- SEMARNAT (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-044-ECOL-1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3857 kg. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 22 de octubre 1993.
- SEMARNAT (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994, que habla de contaminación atmosférica-fuentes fijas-para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 02 de diciembre de 1994.
- SEMARNAT (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 06 de enero de 1977.
- SEMARNAT (1999). Norma Oficial Mexicana NOM-041-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 06 de agosto de 1999.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001, que establece los parámetros de protección ambiental - especies nativas de México de flora y fauna silvestres - categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - lista de especies en riesgo. Secretaría de Medio Ambiente

- y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 06 de marzo de 2002.
- SEMARNAT (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 8 de octubre de 2004. Última reforma 22 de mayo de 2006.
- SEMARNAT (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y manejo especial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 20 de octubre 2004.
- SEMARNAT (2006). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., 111 p.
- SEMARNAT (2009). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Edición 2008. Compendio de estadísticas ambientales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F., 358 p.
- Sitting M. (1975). *Environmental sources and emission handbook*. Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ.
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S.A. (1998). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill, Madrid, 1107 p.
- USEPA (1977). *State Decision-makers guide for hazardous waste management*. United States Environmental Protection Agency (SW612). Washington, D.C.
- USEPA (1973). *Guide for compiling a comprehensive emission inventory*. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- UTHH (2008). *Agenda ambiental de prioridades para la huasteca hidalguense*. Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense-SEMARNAT, Huejutla de Reyes, 16 p.
- UTTT (2006). *Programa institucional de desarrollo ambiental 2005-2009*. Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji, Tula de Allende, 37 p.
- Villavicencio M.A., Escandón B.E. y Aguirre A. (2005). *Guía de la flora útil de la Huasteca y la zona Otomí-Tepehua, Hidalgo I*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, 171 p.
- Villavicencio M.A., Escandón B.E. y Aguirre A. (2003). *Lista de las plantas útiles del estado de Hidalgo*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, 170 p.
- Wark K. y Warner F.C. (2006). *Contaminación del aire. Origen y control*. 8ava reimp. Limusa, Mexico D.F., 650 p.
- Weitzenfeld H. (1989). *Evaluación rápida de fuentes de contaminación ambiental (Aire, Agua y Suelo)*. Traducción de WHO Offset Publication No. 62/1982. ECO-SEDUE, Metepec, 220 p.
- WHO (1983). *Compendium of environmental guidelines and standards for industrial discharges*. World Health Organization, Ginebra.
- WHO (1982). *Rapid Assessment of sources of air, water and land pollution*. World Health Organization, Ginebra.
- WHO (1977). *Toxic and hazardous waste*. Regional Office Europe (Rept. ICP/CEP 402), Copenague.
- WHO (1971). *Solid Waste disposal and control*. World Health Organization, Ginebra. Technical Report Series No. 484.