



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**EVALUACIÓN DE RIESGO POR LA EXPOSICIÓN A
CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA CUENCA ALTA
DEL RÍO ATOYAC, PUEBLA, MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

Mara Jessica Zamora Almazan



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar
2016**

Ciudad Universitaria, D. F.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del jurado

1.Datos del alumno

Zamora Almazan
Mara Jessica
57750921
Universidad Nacional
Autónoma de México,
Facultad de Ciencias
Biología
308130274

2.Datos del tutor

Dr. Rodolfo Omar
Arellano Aguilar

3.Datos del sinodal 1

Dra. Ruth Cecilia
Vanegas Pérez

4.Datos del sinodal 2

Dra. María Eugenia
Gonsebatt Bonaparte

5.Datos del sinodal 3

Dra. Regina Dorinda
Montero Montoya

6.Datos del sinodal 4

Dra. Paola
Velasco Santos

7.Datos del trabajo escrito

Evaluación de riesgo por
la exposición a
contaminantes
atmosféricos en la cuenca
alta del río Atoyac,
Puebla, México
73 p.
2016

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor, Omar Arellano Aguilar por su constante apoyo y comprensión en la realización de esta tesis, ya que además de ser mi tutor, ha sido un buen amigo.

A todas las Doctoras que formaron parte de mi comité: Ruth Vanegas, Eugenia Gonsebatt, Regina Montero y Paola Velasco, gracias por sus revisiones y comentarios que han enriquecido este trabajo.

Un agradecimiento especial a la Dra. Claudia Inés Rivera, por su guía y enseñanzas acerca de sistemas de percepción remota que se aplicaron en este trabajo.

A la “Beca para la titulación para la Educación Superior-2015”, por el apoyo brindado para el término de esta tesis.

A mi familia:

A mis padres (Livia y Miguel) gracias por sus grandes esfuerzos, cariño y apoyo a lo largo de todos estos años y los que vendrán, a Ángel le agradezco ser mi amigo, consejero y hermano, además a mi abuelita y tía, que han estado al pendiente de mi avance a través de los años. Sé que contaré con todos ustedes siempre.

A Héctor gracias por ser parte de esta etapa en mi vida, por compartir el estrés de la tesis, el gusto por la música, entre otras cosas, que han hecho que este camino sea más agradable, *still being yourself!*

Además agradezco a todos los amigos que he encontrado en mi estancia en la Facultad de Ciencias, en especial a: Enya, Joana, Nat, Salsa, Su, Susi, Sam, Camal, Billie, Gio, Serch, Edgar, Guss, y a todas aquellas personas que de una u otra forma han impulsado el término de esta etapa.

A la UNAM.

Stars at night turned deep to dust....(C.P.)

*“La science, mon garçon, est faite d'erreurs,
mais d'erreurs qu'il est bon de commettre,
car elles mènent peu à peu à la vérité.....”*

Jules Verne

ÍNDICE

Resumen	1
1. Introducción	3
1.1-contaminación atmosférica	3
1.1.2-Clasificación de las emisiones de contaminantes antropogénicos.....	3
1.1.3-Clasificación por forma de emisión a la atmósfera.....	5
1.1.4-Clasificación por composición química.....	6
1.1.5. Proceso de contaminación atmosférica.....	8
1.2- Problemática de la contaminación atmosférica en México	9
1.2.1-Efectos de la contaminación atmosférica en el ambiente.....	9
1.2.2-Efectos de la contaminación atmosférica en la salud.....	11
1.3-Monitoreo atmosférico	13
2-Antecedentes	17
3-Hipótesis	19
4-Objetivos	19
4.1-Objetivos específicos.....	19
5-Métodos	20
5.1-Descripción del sitio.....	20
5.2. Programa de monitoreo salud-ambiente.....	21
5.3. Caracterización de exposición y riesgo.....	22
6-Resultados	28
7-Discusión	42
8- Conclusiones	50
9- Consideraciones Finales	51
10-Referencias	51
11- Anexo	61

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de contaminación atmosférica.....	9
Figura 2. Monitoreo Salud Ambiente.....	15
Figura 3. Ubicación de la cuenca alta del río Atoyac.....	20
Figura 4. Metodología para el monitoreo salud-ambiente en la cuenca alta del río Atoyac.....	21
Figura 5. Ubicación de las zonas de mayor exposición.....	27
Figura 6. Numero de industrias que reportaron emisiones al aire en el periodo 2004-2012, por municipio en los 8 municipios del área de estudio.....	28
Figura 7. Número de reportes de los compuestos orgánicos volátiles emitidos en la zona de estudio en el periodo 2004-20012.....	29
Figura 8. Concentración promedio de compuestos orgánicos volátiles en la zona en el periodo 2004-2012.....	29
Figura 9. Dispersión promedio de contaminantes para el año 2005, construida a partir de las mediciones del instrumento OMI.....	39
Figura 10. Concentración promedio de NOx para el periodo 2005-2012 y promedio de viento.....	40
Figura 11. Mapa de Riesgo por exposición a contaminantes en la cuenca Alta Atoyac.....	41

Índice de figuras Anexo

Figura 1. Giros industriales presentes en la cuenca alta Atoyac en el periodo 2004-2012.....	61
Figura 2. Grado de marginación en la cuenca alta Atoyac.....	65
Figura 3. Índice de impacto tóxico por localidad en la cuenca Alta del río Atoyac.....	68
Figura 4. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2005 en la cuenca alta Atoyac.....	69
Figura 5. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2006 en la cuenca alta Atoyac.....	69
Figura 6. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2007 en la cuenca alta Atoyac.....	70
Figura 7. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2008 en la cuenca alta Atoyac.....	70
Figura 8. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2009 en la cuenca alta Atoyac.....	71
Figura 9. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2010 en la cuenca alta Atoyac.....	71
Figura 10. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en	

el año 2011 en la cuenca alta Atoyac..... 72

Figura 11. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en
el año 2012 en la cuenca alta Atoyac..... 72

Figura 12. Máxima densidad de moléculas por centímetro cuadrado
en el periodo 2005 a 2012 en la cuenca alta Atoyac..... 73

Índice tablas

Tabla 1. Métodos de medición de la Calidad del Aire.....	14
Tabla 2. Subíndices utilizados en la obtención del índice de Impacto.....	22
Tabla 3. Subíndices que componen el índice de impacto de cada contaminante.....	23
Tabla 4. Grupo de propiedades.....	24
Tabla 5. Propiedades y su clasificación.....	24
Tabla 6. Propiedades físico-químicas, toxicológicas y carcinogénicas de los compuestos orgánicos volátiles.....	32
Tabla 7. Matriz de impacto calculada para cada COV presente en la zona.....	34
Tabla 8. Índice de impacto Tóxico por localidad.....	36
Tabla 9. Concentración de moléculas de NOx en la columna en el periodo 2005-2012.....	37
Tabla 10. Rango de riesgo.....	38
Tabla 11. Índice de riesgo.....	38

Índice tablas Anexo

Tabla 1. Número de industrias que reportan los compuestos orgánicos volátiles emitidos en la zona de estudio en el periodo 2004-2012.....	62
Tabla 2. Número de reportes de los compuestos orgánicos volátiles emitidos en la zona de estudio en el periodo 2004-20012.....	63
Tabla 3. Concentración promedio de emisiones de Compuestos orgánicos volátiles liberados en el período 2004-2012.....	64
Tabla 4. Densidad de población por municipio.....	66
Tabla 5. Total de mujeres y hombres por municipio.....	67

RESUMEN

A partir del siglo XX la cuenca alta del río Atoyac ha tenido un intenso desarrollo con la instalación de diversos corredores industriales en la zona, lo que generó una continua emisión y descarga de contaminantes, especialmente en el río Atoyac-Zahuapan, por lo que distintos estudios se han orientado a determinar los efectos que ocasiona la presencia de estos compuestos químicos en el agua y en las poblaciones cercanas. Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con análisis de dispersión de contaminantes emitidos por la industria, así como los riesgos que estas sustancias químicas podrían causar a las poblaciones aledañas. En consecuencia, el objetivo central de este trabajo fue determinar la zona de riesgo por exposición a contaminantes atmosféricos en la cuenca alta del río Atoyac. Para esto se seleccionaron dentro de la cuenca a seis municipios del estado de Puebla y dos del estado de Tlaxcala. Posteriormente se generó una propuesta de evaluación de riesgo en la zona, integrando información sobre el efecto de los compuestos orgánicos volátiles presentes en cada municipio y la forma en la que estos se dispersaban, utilizando como modelo de dispersión al dióxido de nitrógeno. Además, se consideró el grado de marginación en la zona como un factor que influye en el riesgo por exposición a contaminantes. Los resultados mostraron que los compuestos que representan un mayor impacto en la salud de la población en el periodo de tiempo analizado fueron: diclorobenceno, benceno, acroleína y furano. Asimismo, la dispersión de los contaminantes en la cuenca es afectada por el viento y el terreno en algunas zonas como San Martín Texmelucan, donde se presentó una densidad baja de moléculas de dióxido de nitrógeno, ya que probablemente estas fueron dispersadas por el viento. En cambio, en los municipios Coronango, Cuautlancingo y Puebla, el viento favoreció la acumulación y mezcla de contaminantes. En estas zonas además, el número de compuestos orgánicos volátiles fue mayor en comparación con los demás municipios y se presentó una alta emisión de moléculas de dióxido de nitrógeno, llegando a alcanzar las 3×10^{15} moléc/cm², esto es relevante ya que en esta zona se concentra el 80% de la industria de todo el estado de Puebla. Respecto a la vulnerabilidad en la zona, no se registró ningún municipio que presentará un alto grado de marginación, los municipios con un índice de marginación medio fueron Nativitas y Cuautlancingo, los demás municipios presentaron índices de marginación bajo. Empleando datos de impacto

tóxico, densidad de moléculas de óxidos de nitrógeno (NOx) y el grado de marginación se generó un índice de riesgo para cada municipio. Se asignó a cada variable (efecto, exposición y marginación) el mismo peso dentro de la ecuación para obtener un índice de riesgo. A partir de lo anterior, se determinaron las zonas de mayor riesgo, las cuales fueron los municipios de Cuautlancingo, San Martín Texmelucan y Puebla. Finalmente, se logró generar un mapa de riesgo por exposición a contaminantes atmosféricos en la cuenca, que servirá como base para el diseño de estudios eco-epidemiológicos, así como un antecedente para la implementación de vigilancia de calidad del aire en la cuenca alta del río Atoyac.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se podría definir como todo hecho por el cual el ser humano ha modificado la composición química natural de la atmósfera y se podría remontar al inicio del dominio del fuego por el ser humano (Daly y Zannetti, 2007). Pero es a partir del siglo XVII con la revolución industrial que estos cambios en la atmósfera se tornaron notorios, debido a que la fuerza del hombre comienza a ser sustituida por el uso de máquinas de vapor (para abaratar los costos y aumentar la producción en serie), desarrollando un incremento en la liberación de compuestos derivados de la quema de combustibles fósiles. Con el aumento de la Industrialización y la emisión de contaminantes antropogénicos a través de los años se han observado distintos efectos de acuerdo a la escala de estudio desde escala local, regional o global como la lluvia ácida, el smog fotoquímico y los gases efecto invernadero, entre otros (Manahan, 2007).

1.1.2. Clasificación de las emisiones de contaminantes antropogénicos

Las sustancias químicas contaminantes emitidas en la atmósfera por fuentes antropogénicas se clasifican de acuerdo con su fuente de emisión, su forma de emisión y composición química. Es por esto que a continuación se hace una descripción de cada tipo de clasificación.

Las **fuentes de emisión** de contaminantes pueden ser móviles, difusas y estacionarias (Aristizábal, 2006). *Las fuentes móviles* incluyen a todo tipo de medio de transporte como aviones, helicópteros, ferrocarriles, autobuses, camiones, automóviles. Esta fuente contribuye con el 68.2% del total de las emisiones a la atmósfera (Morales, 2006). Los contaminantes que se emiten dependen del tipo de motor que se utilice, por ejemplo los vehículos que emplean gasolina como carburante emiten monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y hasta el año de 1997 compuestos de plomo (Pb), en cambio los vehículos que utilizan motores de tipo diésel generan NOx y anhídrido sulfuroso (Olmedo y Jiménez, 2012).

Las fuentes difusas se refieren a los procesos en los que la emisión de una fuente se dispersa en un área (Colombia, 1999), como los procesos de quema a cielo abierto, actividades agropecuarias y minería (Aristizábal, 2006). En esta última actividad, los procesos de cargue, descargue, trituración y transporte del material generan emisiones de material particulado (Banerjee *et al.*, 2013).

Las fuentes estacionarias son las industrias que emiten contaminantes desde puntos fijos y rastreables sobre la superficie de la tierra; estas pueden ser de tipo eléctrica, química, petroquímica, entre otras. Dependiendo del proceso específico de producción pueden emitir uno o varios contaminantes al aire, que posteriormente se consideran contaminantes criterio, si es que presentan una mayor abundancia en las zonas urbanas y su exposición supone un peligro para la salud humana, estableciendo métodos de monitoreo y normas ambientales para su control (Ocaña *et al.*, 2001). Los compuestos considerados como contaminantes criterio son los siguientes: dióxido de azufre (SO_x), óxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV) (Jiménez, 2011).

En general, las fuentes estacionarias se monitorean a través de métodos directos o indirectos. Los directos se basan en la medición *in situ* de los contaminantes, y los indirectos utilizan método como: la estimación por medio del balance de materiales que se basa en el cálculo de la cantidad de sustancias que entran o salen de un proceso, también se utilizan los factores de emisión ya publicados y en estos se relaciona la cantidad de emisión de acuerdo al tipo de equipo utilizado., por último se ocupan métodos de cálculo empleando formulas ya publicadas para determinar procesos como la volatilización de las sustancias entre otros (SEMARNAT, INECC, 2005). A partir del monitoreo de contaminantes se generan herramientas para la gestión de la calidad del aire y toma de decisiones, una de estas herramientas es el uso de los inventarios de emisión, los cuales incorporan la información de las fuentes emisoras, así como el tipo y cantidad de contaminantes en periodos anuales. Por ejemplo, el registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes de México (RETC) (SEMARNAT, 2012) que surge en el año de 1994 como un esquema voluntario, con el registro de 105 sustancias químicas. Actualmente es una norma de carácter obligatoria con una lista de 200 sustancias químicas contaminantes (NOM-165-SEMARNAT-2013). Estos contaminantes se dividen

en ocho categorías: compuestos orgánicos persistentes (COP), sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO), metales pesados, gases de efecto invernadero (GEI), hidrocarburos aromáticos y alifáticos, sustancias órgano halogenadas (AOX), plaguicidas y otras sustancias tóxicas (NOM-165-SEMARNAT-2013).

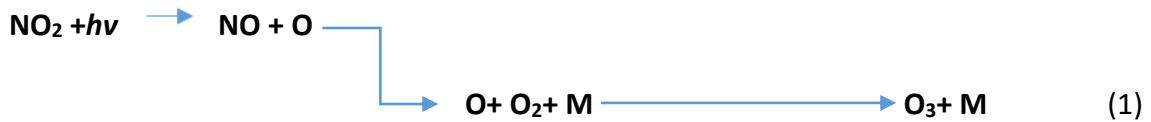
En México existen programas consolidados para el monitoreo de fuentes puntuales y móviles como son: los sistemas de monitoreo atmosférico (SIMAT), utilizados en la Zona Metropolitana del Valle de México, el Sistema de Monitoreo Ambiental de Monterrey (SIMA) y las Redes Automáticas de Monitoreo establecidas en los estados de Guadalajara, Puebla y Toluca (RAMA). En estos programas de monitoreo se utilizan estaciones que miden los contaminantes criterio (O_3 , CO, SO_2 , NO, PM_{10} , NO_x) y demás parámetros meteorológicos como humedad relativa (HR), temperatura (TMP), dirección (DV) y velocidad de viento (VV) (Zuk *et al*, 2007). Esta información se actualiza cada hora en las páginas electrónicas y de esta manera se cuenta con información suficiente de al menos 5 años para que se realicen análisis del comportamiento de contaminantes (Zuk *et al*, 2007).

1.1.3. Clasificación por forma de emisión a la atmósfera

Los contaminantes que se emiten por las fuentes ya mencionadas se pueden clasificar además, de acuerdo con la forma en la que ingresa a la atmósfera ya sea como contaminantes primarios o secundarios.

Los **contaminantes primarios** son los que se encuentran dispersos en la atmósfera en la misma forma química en la cual se emitieron por ejemplo los óxidos de sulfuro (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos (HC) (Campos, 2000).

Los **contaminantes secundarios** son los que se forman en la atmósfera por medio de reacciones fotoquímicas, oxidación o hidrólisis. En esta clasificación entrarían contaminantes como el ozono (O_3) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Campos, 2000). El ozono se produce en la troposfera debido a que aquí se acumula dióxido de nitrógeno (NO_2) que al fotolisarse se descompone en oxígeno atómico que posteriormente reacciona con el oxígeno molecular para generar ozono (O_3) (Manahan, 2007), como se observa en la siguiente reacción (1):



Después de que ocurre esta reacción se puede generar otra reacción con el óxido de nitrógeno (NO) y el ozono, generando nuevamente NO₂, manteniendo el volumen de ozono y dióxido de nitrógeno en la troposfera (Manahan, 2007).

1.1.4. Clasificación por composición química

La siguiente forma de clasificación se basa en los elementos característicos que componen a cada contaminante en la atmósfera como a continuación se describe:

Compuestos nitrogenados: incluyen muchos de los óxidos nítricos (NO), dióxidos de nitrógeno (NO₂) y amonio.

Los óxidos nítricos (NO) se producen en la naturaleza por la combinación del oxígeno y el nitrógeno durante los relámpagos (Mudakavi., 2010).

Los dióxidos de nitrógenos (NO₂) son producidos en procesos de combustión que envuelven al nitrógeno y al oxígeno atmosférico a altas temperaturas (Mudakavi., 2010).

Compuestos del azufre (SO_x): incluyen diversas especies de óxidos pero el contaminante representativo es el dióxido de azufre (SO₂). Estos compuestos son emitidos por distintas fuentes de contaminación móviles (quema del carbón, combustóleo, gasolina y diésel) y fijas como altos hornos, refinerías y plantas de producción de azufre (SEMARNAT, INE, 1999).

Óxidos de carbono: se pueden encontrar en dos distintas formas ya sea como monóxido o como bióxido de carbono.

Monóxido de Carbono (CO): se producen cuando las materias carbonáceas pasan a través de equipos defectuosos y combustionan de forma incompleta. La principal fuente de emisión de este compuesto son los vehículos (Davies *et al.*, 2000).

Bióxido de carbono (CO₂): se produce por la quema de combustibles fósiles y es el principal compuesto de origen antropogénico emitido (Common y Stagl, 2008).

Compuestos orgánicos volátiles (COV): son gases reactivos foto químicamente que están formados por hidrocarburos y pueden contribuir a la formación del smog, las principales fuentes de emisión son los escapes de vehículos, la evaporación de los tanques de combustible y los disolventes utilizados en la metalurgia (SEMARNAT, 2005, Puigcerver y Dolors, 2008). Estos contaminantes se clasifican en volátiles, semivolátiles y muy volátiles.

Volátiles: compuestos químicos que se hallan en fase gaseosa, con una temperatura de ebullición de 100°C, algunos ejemplos de estos compuestos son el formaldehído, d-limoneno, tolueno, acetona, etanol, 2-propanol, hexanal (Castells, 2012).

Semivolátiles: compuestos que pueden encontrarse en forma de partícula o gas en la atmósfera, con una temperatura de ebullición de 380- 400°C. Estos se producen por la combustión incompleta de materia orgánica, en procesos como la incineración, siendo posteriormente absorbidos por partículas sólidas en suspensión. Los furanos y dioxinas se incluyen en esta clasificación, ya que provienen de la combustión incompleta de compuestos organoclorados en hornos de fundición, chatarra y procesos de incineración a altas temperaturas (Bejarano, 1995, Puigcerver y Dolors, 2008).

Compuestos orgánicos muy volátiles: éstos son difíciles de medir debido a que su temperatura de ebullición se encuentra por debajo de los 100°C., éstos se encuentran casi en su totalidad en forma de gases en el aire. Algunos ejemplos son el propano, acetaldehído, acroleína, butano y cloruro de metilo (Salthammer, 2014).

Hidrocarburos no quemados: están formados por distintos componentes que se encuentran sin quemar o están parcialmente oxidados., algunos ejemplos son el carbono y el hidrógeno (Merker *et al.*, 2006).

Partículas suspendidas: son una mezcla de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire que dependiendo de su tamaño se clasifican de la siguiente manera (Zuk *et al.*, 2007):

Partículas Suspendidas Totales (PST): son partículas menores a 100 micras de diámetro.

PM₁₀: son partículas de 10 micras de diámetro.

PM_{2.5}: son partículas de 2.5 micras de diámetro, junto con las PM₁₀ poseen una mayor persistencia y transporte en la atmosfera que las PST.

1.1.5. Proceso de contaminación atmosférica

El proceso de contaminación en la atmósfera inicia con la emisión de contaminantes por las distintas fuentes, una vez que estos se encuentran en la atmósfera, se dispersan por movimientos horizontales o verticales. Los movimientos horizontales o también conocidos como vientos, son generados por la diferencia en la presión atmosférica, es decir el aire se mueve de un área de alta presión a una de baja presión, dando lugar al viento que diluye y dispersa los contaminantes en las áreas circundantes, generalmente el viento se dirige de este a oeste por el movimiento de rotación en la tierra (Verma y Desai, 2008). En cuanto a los movimientos verticales, estos se generan debido a las condiciones inestables de la atmósfera durante el día y la noche, en la noche ocurre el movimiento del aire caliente por encima del aire frío, generando un movimiento vertical que favorece la mezcla y dispersión de los contaminantes, por la mañana las masas de aire invierten su acomodo, pero si el efecto de noche permanece en el día se genera un efecto conocido como inversión térmica que mantienen los contaminantes en la superficie (Inche, 2004). Además, durante la dispersión pueden ocurrir procesos de transformación de contaminantes que posteriormente se depositan de forma seca o húmeda a los océanos, sedimentos o directamente a las poblaciones ocasionando efectos en el ambiente y en la salud. La deposición seca se produce a través de la transferencia directa de los contaminantes por acción de la gravedad y el viento hacia la superficie, en cambio la deposición húmeda consiste en el transporte de los contaminantes por acción de la lluvia, la nieve o la niebla (López, 1998; Fig. 1).

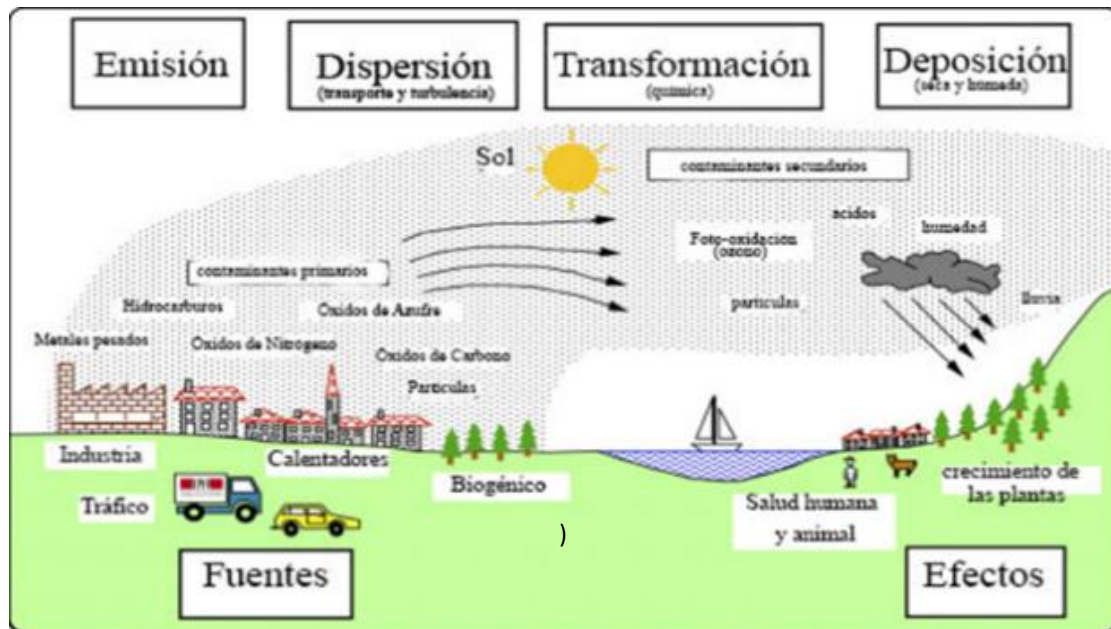


Figura 1. Proceso de contaminación atmosférica (modificado de Li *et al.*, 2012)

1.2. Problemática de la contaminación atmosférica en México

La contaminación atmosférica es una de las problemáticas más importantes a nivel mundial ya que tiene efectos sobre el ambiente y la salud de las poblaciones. De acuerdo al *Clear Air Institute* en el año 2008, México obtuvo el segundo lugar en muertes por contaminación atmosférica de toda América Latina con 15 mil decesos por año (superado por Brasil con 23 mil muertes al año), esto se atribuyó al aumento en la densidad de la población y a los efectos secundarios generados por el desarrollo económico (CAI., 2012).

En este capítulo, la primera sección enfocará los efectos a nivel local y regional sobre el ambiente y en la segunda sección se dará evidencia de los efectos en la salud por la exposición a contaminantes atmosféricos en México y a nivel Mundial.

1.2.1. Efectos de la contaminación atmosférica en el ambiente

Como ya se mencionó en el primer capítulo, a nivel local la contaminación puede generar un efecto conocido como lluvia ácida que se forma a partir de la oxidación del óxido de azufre (2) y nitrógeno (4,5) a ácido sulfhídrico (3) y nítrico (6), por las siguientes reacciones (Garcés *et al.*, 2004).





Una vez formados estos compuestos son transportados y depositados de forma húmeda o seca, llegando a afectar los ecosistemas: en el suelo ocasionan la pérdida de nutrientes, en las plantas remueven la cubierta cerosa que poseen, afectando así el proceso fotosintético; además la lluvia ácida provoca la acidificación de ecosistemas acuáticos e incrementa las afecciones respiratorias en las poblaciones humanas (Casas y Alarcón, 1999, Gaecés *et al.*, 2004).

Otro efecto de la contaminación atmosférica a nivel regional, es la producción de niebla fotoquímica o *smog*; si bien aún no son claros todos los procesos que intervienen en la formación de la niebla (Campos, 2000). No obstante, se conoce que los hidrocarburos y dióxidos de nitrógeno intervienen en este proceso, por ejemplo al absorber la luz solar el dióxido de nitrógeno se disocia formando oxígeno atómico que posteriormente reacciona con oxígeno molecular para la formación del ozono (ver sección 1.2) que se acumula en la troposfera (Contreras y Molero, 2011). En cuanto a los hidrocarburos su oxidación genera productos como: aldehídos, cetonas, ácidos y peróxidos que limitan la visibilidad en las ciudades donde se genera (Baird, 2004). Los efectos más notables sobre el ecosistema son daños en las plantas, que pueden ir desde impedir los procesos fotosintéticos por la ausencia de luz, hasta los daños directos como daños foliares debido a que compuestos fluorados ingresan en las hojas a través de los estomas, o que el ozono troposférico dañe las células de parénquima empalizada (Raven *et al.*, 1992). También la exposición a ozono deteriora materiales como el caucho natural, debido a procesos de ozonólisis (pérdida de agua y deshidratación). En animales se ha observado que la exposición a la niebla puede acelerar el envejecimiento y causar alteraciones en los cromosomas (Contreras y Molero, 2011).

1.2.2. Efectos de la contaminación atmosférica en la salud

La contaminación atmosférica no solo causa degradación ambiental, también ha desencadenado impactos negativos en la salud de las personas alrededor del mundo. Por ejemplo, en 1948 en Donora, Pensilvania, la emisión de contaminantes desde fuentes fijas, más un proceso de inversión térmica en la zona generó la acumulación de compuestos como el óxido de sulfuro con partículas de metales y compuestos metálicos, lo que causó la muerte de 20 personas y más de 100 enfermos (Glyn y Heinke, 1999). Otro episodio de contaminación asociado a la salud ocurrió en 1952 en Londres después de la exposición a smog con altas concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) y material particulado, ocasionando la muerte de 4000 personas (Martínez y Díaz, 2004).

En México no ha ocurrido un episodio como los ya descritos, pero la intensa emisión de contaminantes en el país se ha relacionado con el deterioro en la calidad de vida de las personas. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la industria, el tipo de topografía, la mala calidad del combustible diésel, las condiciones del clima y la inversión térmica han exacerbado el problema de contaminación, generando una reducida dispersión de los contaminantes, afectando aproximadamente a 25 millones de personas (Instituto Nacional de Ecología, 2004, OPS., 2005). De manera similar se observa en las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Puebla aun cuando las condiciones climáticas y topográficas son diferentes (García *et al.*, 2012).

Los principales contaminantes emitidos en estas cuatro zonas son dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, e hidrocarburos como COV (García *et al.*, 2012, Cardenas *et al.*, 2003). Los efectos a la salud humana generados por estos contaminantes varían dependiendo del tipo de exposición, si es aguda (en un corto plazo) o crónica (a largo plazo), de la susceptibilidad de la persona (si presentó previamente enfermedades crónicas), si fuma ó de su situación económica, entre otros aspectos (Oyarzun, 2006). La exposición a los contaminantes más los factores ya descritos están relacionados con un aumento en la mortalidad y morbilidad, debido a enfermedades tales como las de tipo respiratorias y cardiovasculares (Quiroga, 2007). Por ejemplo, se ha asociado que el aumento en las ciudades de 50 µg/m³ de dióxido de nitrógeno puede resultar en el incremento de muertes hasta en un 1.3% de la población (Romeiu *et al.*, 2003). Además,

Linaker *et al.* (2000) reportó que la exposición aguda a dióxido de nitrógeno aumenta el riesgo de padecer cuadros asmáticos exacerbados en niños de 7-12 años de edad, al estar expuestos a concentraciones mayores o iguales a $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a las personas con exposición crónica, estas pueden presentar el síndrome de disfunción reactiva de las vías aéreas (RADS) que ocurre después de repetidas exposiciones a altos niveles de contaminantes irritantes, generando síntomas como obstrucción bronquial o hiperactividad bronquial, una vez que el dióxido de nitrógeno ingresa en el organismo es convertido a óxido nítrico el cual oxida las vías aéreas distales, causando daños en la función y estructura de las células de los pulmones, también el dióxido de nitrógeno libera radicales libres que pueden generar daños en la membrana celular, alterando las funciones inmunes del organismo y disminuyendo su resistencia a enfermedades (Costa y Oriols, 2005; Jenkis, 2015).

En cuanto a los dióxidos de carbono los efectos en la salud no se conocen con exactitud. Los estudios que se tienen de efectos agudos relacionados con estos contaminantes son de trabajadores de industrias que han sido expuestos accidentalmente a grandes cantidades de dióxido de carbono presentando síntomas como dolor de cabeza, disnea, mareo, dolor en el pecho y en algunos casos, leves complicaciones cardíacas (Halpern *et al.*, 2004). En cambio, los efectos a la salud relacionados con la exposición a compuestos orgánicos volátiles son amplios, ya que dependiendo del tipo de contaminante puede causar euforia o dolor de cabeza a bajas concentraciones y a elevadas concentraciones puede ocasionar fallos en el sistema respiratorio, fallos en los riñones, cáncer y la muerte. En un estudio realizado por Glass *et al.*, (2003) se evaluó la exposición a benceno en trabajadores de una industria petrolera en Australia, encontrando que a exposiciones acumulativas de más de 8 ppm al año, el riesgo de desarrollar leucemia aumentaba. Asimismo, también se ha encontrado una relación entre la exposición a formaldehído en trabajadores de industrias o funerarias con la aparición de leucemia (Ajalla *et al.*, 2013). En cuanto a la exposición a acroleína, en concentraciones elevadas se puede generar disfunción reactiva de las vías aéreas (RADS) y lesiones en el tracto respiratorio inferior, el proceso por el cual se generan estas lesiones no está bien caracterizado (Medinger y Spagnolo, 1989). Por último, la combinación de compuestos orgánicos volátiles también puede

generar una disminución en la función pulmonar y un aumento en el asma. En 2003, Delfino y colaboradores observaron que el incremento en episodios de asma en niños hispanos en Los Ángeles, analizando las muestras del aliento en los episodios de asma, se debía a la presencia de benceno, cloruro de metileno, estireno, tetracloroetileno, tolueno, m-xileno, p,o-xileno y p-diclorobenceno en el aire.

1.3. Monitoreo atmosférico

La necesidad de implementar programas de monitoreo que permitan identificar la problemática de contaminación atmosférica en las grandes ciudades es una de las prioridades de la agenda pública de hoy en día, ya que se reconoce la estrecha relación que existe entre la contaminación atmosférica con la aparición y gravedad de enfermedades, como las descritas en el anterior capítulo. Los tipos de monitoreo que se utilizan en México son de identificación, asociación y exposición.


El monitoreo de identificación: se basa en la identificación constante de un gran número de contaminantes nuevos que ingresan a la atmósfera, la desventaja de este tipo de monitoreo es que se requiere de instrumentos de alto costo y sensibilidad por lo cual su implementación no es factible para un gran número de ciudades, la ventaja es que se tiene un mayor conocimiento de las sustancias que se emiten a través del tiempo (Weitzenfeld, 1996; Tabla 1).

Monitoreo por asociación: se basa en utilizar sensores que detecten los contaminantes precursores o la degradación de otros contaminantes. Las desventajas son que no se pueden identificar los compuestos secundarios y además no se relacionan los resultados con datos de efectos en la salud, sin embargo este monitoreo permite entender mejor los procesos fotoquímicos del lugar monitoreado (Weitzenfeld, 1996, Jaimes y Retama, 2013).

Monitoreo de exposición: se basa no solo en el monitoreo del ambiente sino; también en considerar las posibles rutas de exposición a los contaminantes ya sea por inhalación, ingestión o absorción, es decir incluye todos los elementos que ligan a las fuentes de contaminación con la población receptora. Debido a lo complejo de medir las múltiples rutas de exposición y transporte, los estudios se realizan por separado y posteriormente se comparan (Weitzenfeld, 1996). Un

ejemplo de este monitoreo son los nuevos estudios de riesgo, que intentan relacionar la salud y el ambiente utilizando biomarcadores que permiten al evaluador caracterizar los efectos de los contaminantes en la salud, y por medio de monitoreo ambiental (datos de monitoreo o determinación del contenido de sustancias tóxicas en el aire, agua o suelo) identificar rutas de exposición y destino de los contaminantes (Suter, 2000; Arellano-Aguilar *et al.*, 2014). Las desventajas de este tipo de monitoreo como ya se mencionó son que se necesita dividir el estudio de los compartimentos y además se requiere personal especializado para las caracterizaciones de exposición y efecto (Weitzenfeld, 1996). La ventaja es que permite generar datos integrados con los cuales se puede elaborar un mapa de riesgo salud-ambiente, que puede ser utilizado en la toma de decisiones inmediatas para la prevención de daños a la salud y al ecosistema (Arellano-Aguilar *et al.*, 2014).

Tabla 1. Métodos de medición de la Calidad del Aire

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	
Muestreo pasivo	Funciona a través de la difusión molecular a un material absorbente para contaminantes específicos, durante un determinado periodo (que generalmente varía entre una semana y un mes).	-Bajo costo -Sencillos -Útiles para estudios de base	-No son útiles para monitorear algunos contaminantes	
Muestreo activo	Funciona bombeando un volumen conocido de aire a través de un colector ya sea un filtro o una solución química durante un determinado periodo y luego se retira para el análisis.	-Bajo costo -Fácil de operar -Datos históricos	-Requiere análisis en el laboratorio.	
Muestreo con bioindicadores	Implica el uso de especies vivas, como árboles, plantas y líquenes, donde su superficie funge como receptora de contaminantes	-Bajo costo -Presencia y efectos de contaminantes	-Problemas en la estandarización	
Método automático	La muestra se analiza en línea y en tiempo real, a través de métodos electro ópticos: absorción de UV o IR.	-Altas características -Datos horarios -Información en tiempo real	-Complejos -Costosos -Requieren personal capacitado	
Método óptico: percepción remota	Utiliza técnicas espectroscópicas de larga trayectoria para medir las concentraciones de los contaminantes en tiempo real. Los datos se obtienen mediante la integración entre el detector y una fuente de luz a lo largo de una ruta determinada.	-Proveen de datos en un determinado espacio -Medidas de multicomponentes -Histórico	-Complejos -No siempre comparables con medidas puntuales.	

Fuente: Elaboración del autor a partir de INE, *Manual 3* 2010, DIGESA, *Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos* 2005.

A continuación se muestra una propuesta para el monitoreo de exposición que integra un sistema de vigilancia tanto ambiental como epidemiológica (Fig. 2):

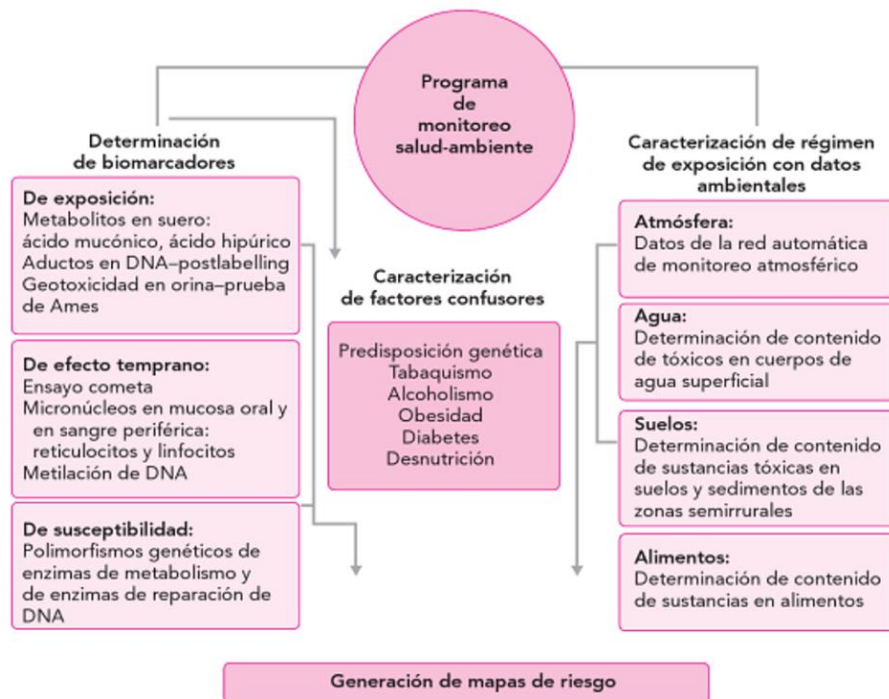


Figura 2. Monitoreo Salud Ambiente, tomado de Arellano-Aguilar *et al.*, 2014

Como se ha mencionado, los tipos de monitoreo que se aplican actualmente en México son los de tipo “identificación” y “asociación” por lo que no relacionan el componente salud, de tal manera que para un estudio enfocado a la toma de decisiones y prevención se requiere complementar con la caracterización de la exposición a contaminantes atmosféricos en el monitoreo salud-ambiente. En específico, el método de percepción remota puede representar una alternativa de bajo costo (si es que se utilizan datos previamente procesados), para caracterizar y analizar el comportamiento de la exposición de los contaminantes atmosféricos.

Los sensores de análisis atmosféricos utilizados por los satélites permiten una mayor cobertura de diferentes regiones, además de proveer información constante y actualizada que permite caracterizar la exposición de manera espacial y temporal (Bartel *et al.*, 1995, Li *et al.*, 2011). Un ejemplo de un sensor que podría ser utilizado para el monitoreo de contaminantes en la atmósfera es el *Ozone Monitoring Instrument de la NASA*; este sensor de tipo pasivo emplea imágenes híper espectrales de tipo empuje-escoba con una cobertura de huella de tierra de 14x 24 km, que permite observar la

retro-dispersión de la radiación solar en la gama visible y ultravioleta, que se utiliza para generar una columna en la que se observa la densidad de moléculas de gases en la superficie terrestre. Las moléculas que puede monitorear son los óxidos de nitrógeno (NO_x), formaldehído (CHOH), óxidos de bromo (BrO), Dióxidos de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de cloro (OCIO) (NASA, 2007, MacCormic *et al.*, 2013). Esta tecnología está siendo empleada para un monitoreo atmosférico global. En los próximos años se espera la incorporación de nuevos satélites que monitorearán la química atmosférica y la presencia de un mayor número de contaminantes, asociados a efectos adversos en la salud (*M. Gutter coms. pers.*)

2. ANTECEDENTES: SITIO DE ESTUDIO

Históricamente, la Cueca Alta del Río Atoyac ha tenido un desarrollo industrial-rural, ya que a partir del siglo XX se inició la instalación de distintos corredores industriales, entre ellos los complejos Independencia y Quetzalcóatl, además de distintas fábricas distribuidas en los municipios de Puebla, Huejotzingo, San Martín Texmelucan y Cuautlancingo. Para el año de 1990, el proceso de industrialización ya había desplazado casi en su totalidad a las actividades primarias, ubicándose como la principal zona de actividades económicas secundarias en la región hidrológica del Balsas Norte (Morales, 2010, Salas, 2014).

El intenso desarrollo industrial a través de los años y la emisión consecuente de diversos contaminantes causando la degradación ambiental y afectando a la salud de los pobladores, quienes comenzaron a reportar el aumento de enfermedades de tipo respiratorias y leucemia (Tribunal Latinoamericano del Agua, 2006). Debido a esto, en el año 2006, el Tribunal Latinoamericano del Agua (TLA) examinó el problema de contaminación del río, emitiendo un dictamen, refiriéndose a él como un peligroso desastre social y ambiental (Tribunal Latinoamericano del Agua, 2006). A partir del dictamen del TLA, el gobierno inició la operación de distintos procesos de saneamiento, los cuales no fueron suficientes para revertir el proceso de degradación en el río. En el 2015, con el apoyo de distintas organizaciones sociales, el gobierno se comprometió a inspeccionar y sancionar a las industrias que no cumplan las normas ambientales en sus descargas de agua y contaminen gravemente al río.

Dentro de los estudios que han evaluado la exposición a contaminantes provenientes del río, destacan los estudios de Romano (1999), Zamora *et al.* (2000), Montero *et al.* (2006) y Solís (2013), donde relacionan el alto daño genotóxico presente en la población, con la contaminación del río Atoyac. Además, en 2008, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) presentó una evaluación de riesgo ambiental enfocada a determinar el riesgo asociado a vivir cerca del río, estableciendo un perímetro de 2 km de distancia a partir del cauce del río, utilizando métodos microbiológicos y físico-químicos para el monitoreo de agua. Sin embargo, para establecer una relación más precisa del riesgo ambiental y de salud en la cuenca, es necesario realizar estudios que

incluyan la dispersión de contaminantes tanto en el aire como en el suelo. Lo anterior complementará los estudios ya realizados en el agua. En relación a la contaminación atmosférica, el Instituto Mexicano para la competitividad (IMCO) señaló que debido a la mala calidad del aire en esta zona ocurrieron 48 muertes, 88 hospitalizaciones y 6,691 consultas en 2010. A pesar del reporte del IMCO, el único programa encargado del análisis y monitoreo de los contaminantes atmosféricos presentes en la cuenca es el programa de gestión de la calidad del aire del estado de Puebla (Pro-Aire) que inició el monitoreo de contaminantes en el año 2006, con la finalidad de mejorar la calidad del aire, a través de la gestión y regulación de las fuentes móviles, fijas, de área y fuentes naturales (SEMARNAT, 2012). Si bien este programa no deja a un lado la problemática de salud por la exposición a contaminantes, sigue sin tener un enfoque que permita integrar y caracterizar los riesgos por la exposición a los contaminantes atmosféricos en toda la cuenca.

A partir de lo anterior, en la zona de estudio se identificó que el sistema de monitoreo atmosférico de contaminantes no tiene cobertura en las poblaciones en donde los problemas de salud se han presentado. En consecuencia, la caracterización del riesgo por exposición a contaminantes atmosféricos en la cuenca alta del río Atoyac es de gran relevancia. El propósito de este trabajo es obtener a partir de la dispersión de contaminantes como los dióxidos de nitrógeno y las fuentes fijas de contaminación una propuesta de mapa de riesgo, incluyendo aspectos de vulnerabilidad mediante el grado de marginación social. Con esta aproximación se busca promover además, el uso de herramientas como los datos de percepción remota y sistemas de información geográfica para los estudios de riesgo salud-ambiente.

3. HIPOTESIS

La dispersión de contaminantes se concentra en las fuentes de emisión y se extiende de forma gradual, afectando a distintos municipios. En consecuencia, dependiendo del comportamiento de la dispersión de contaminantes se puede identificar zonas de riesgo a la salud humana por la exposición a contaminantes.

4. OBJETIVO GENERAL

Determinar la zona de riesgo por exposición a contaminantes atmosféricos en la cuenca alta del río Atoyac.

4.1. Objetivos específicos

- Obtener la densidad de moléculas sobre la columna, del contaminante óxido de nitrógeno (NOX), como indicador de los patrones de dispersión de contaminantes en la cuenca.
- Obtener información de la actividad industrial, del tipo y del volumen de contaminantes emitidos a la atmósfera, para seleccionar e identificar los principales compuestos emitidos en los municipios bajo estudio en la cuenca.
- Determinar el impacto de cada contaminante seleccionado por medio de la utilización de datos bibliográficos y el uso de un modelo matemático de impacto.
- Determinar por medio de un modelo matemático la mezcla toxicológica de contaminantes en cada municipio seleccionado.
- Obtener información del grado de marginación en la zona.
- Determinar un índice de Riesgo por municipio, utilizando la información obtenida de: mezcla toxicológica, marginación y dispersión de contaminantes. Así como caracterizar de manera espacial el riesgo de exposición.

5. MÉTODOS

5.1. Descripción del sitio

La cuenca alta del río Atoyac se ubica dentro de la región hidrológica número IV, cubre una extensión territorial de 3,254 km², sobre 48 municipios de los cuales, 28 pertenecen al estado de Puebla y 20 al estado de Tlaxcala (Gobierno del Estado de Puebla, 2013).

En cuanto a la hidrología subterránea, la cuenca posee una recarga media anual de 199.9 Hm³ de los cuales son extraídos 100.5 Hm³ (GEP, 2013). Los principales ríos que la atraviesan a nivel superficial son el río Zahuapan y Atoyac. El río Zahuapan desciende del norte del bloque Tlaxcala y aguas abajo, se une con el río Atoyac que proviene de los veneros Orientales de la Sierra Nevada, como ya se mencionó estos ríos tienen problemas de contaminación debido a la descarga industrial (GEP, 2013). A nivel de fisiografía la cuenca se encuentra inmersa dentro del Valle Poblano Tlaxcalteca perteneciente al Eje Neovolcánico, localizado a una altitud de los 2,000 a 3,000 m.s.n.m (Fig.3) (Cuervo, 2010). El terreno en general es plano por lo que los sistemas meteorológicos no tienen grandes variaciones, el clima es de tipo templado húmedo con lluvias en verano, la temperatura se mantiene en promedio en un intervalo de 6 a 12°C, el nivel de precipitación anual es de 812 mm y la velocidad del viento varía, en verano y otoño el promedio es de 11.54 km/h con una dirección N y NE, mientras que en primavera-invierno los vientos dominantes son S-SO con una velocidad promedio de 6.48 km/h (SMNR, 2012; Cuervo, 2010).

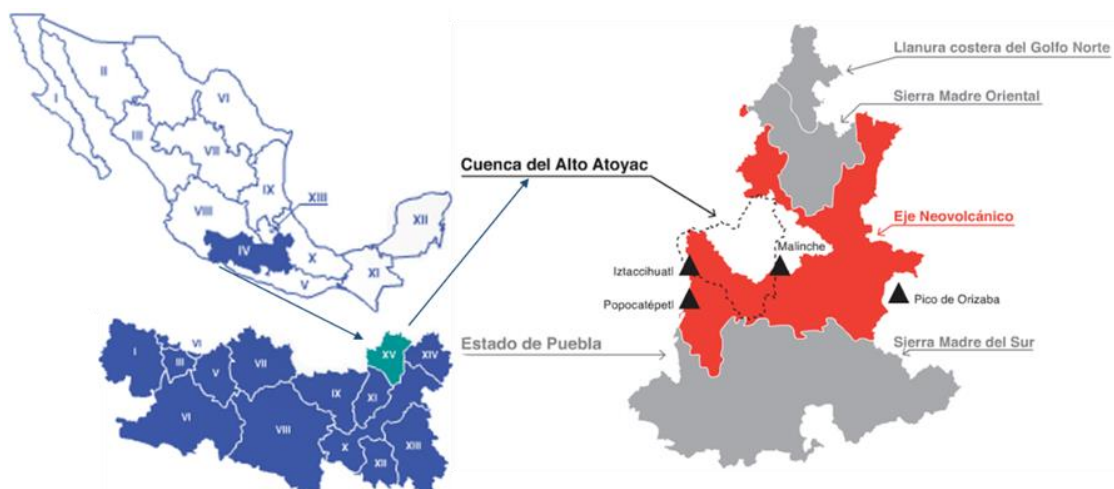
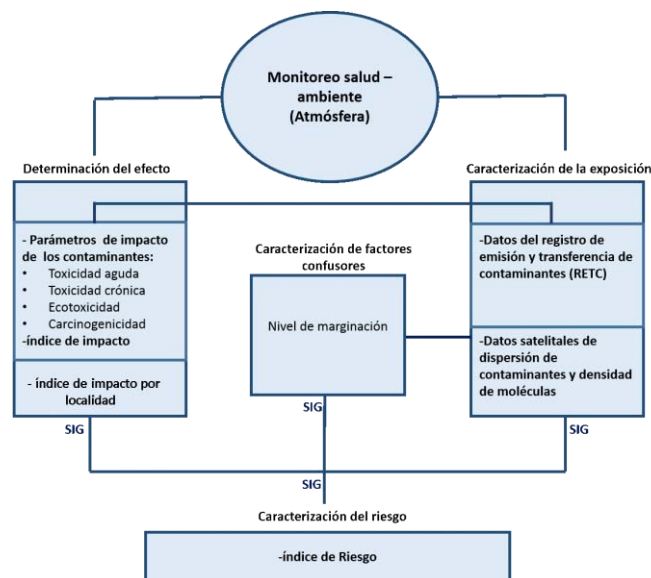


Figura 3. Ubicación de la cuenca alta del río Atoyac. En color azul la región hidrológica número IV y en la zona punteada negra la cuenca (Modificado de Taller 13, 2011).

5.2. Programa de monitoreo salud-ambiente

Se utilizó como base el programa de monitoreo salud-ambiente propuesto por Arellano *et al.* (2014), pero fue necesario adaptar la metodología para que esta alcanzara los objetivos del trabajo (Fig. 4). Por lo tanto el monitoreo fue dividido en:

1) Identificación de la exposición: se utilizaron datos satelitales e información de los contaminantes emitidos por la industria; 2) determinación del efecto: se utilizaron índices de impacto por compuesto e índices de impacto por localidad; 3) caracterización de factores confusores: ubicando el nivel de marginación socio-económica; 4) caracterización del riesgo: se integró la información de efecto, exposición y marginación en un índice de riesgo.



SIG: sistemas de información geográfica

Figura 4. Metodología para el monitoreo salud-ambiente en la cuenca alta del río Atoyac (modificada de Arellano *et al.*, 2014)

La zona de estudio comprendió los municipios distribuidos a lo largo de los ríos Atoyac y Zahupan cuyas industrias reportaron datos de emisión de contaminantes de fuentes puntuales al Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes (RETC). Los municipios seleccionados fueron: Puebla, Coronango, Cuautlancingo, San Martín Texmelucan, Huejotzingo, San Pedro Cholula del estado de Puebla y los municipios de Nativitas, Papalotla de Xicohtécatl del estado de Tlaxcala.

5.3. Caracterización de exposición y riesgo

Para la caracterización de la exposición y efecto, en primer lugar, se consideraron los datos de los compuestos químicos emitidos al aire en la zona, durante el periodo comprendido del 2004 al 2012, a partir de la aplicación RETC (<http://app1.semarnat.gob.mx/retc/index.html>), de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en donde además se filtraron los datos: por entidad federativa, municipio y año de los reportes.

Con la información de los contaminantes emitidos al aire, se identificaron los compuestos que por sus características químicas y físicas podrían llegar a dispersarse con mayor facilidad y rapidez en la atmósfera, por lo que se seleccionaron los datos de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno presentes en la zona. Estos datos se analizaron por medio de estadística descriptiva y dependiendo del comportamiento en la distribución de las variables, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión Microsoft® Excel 2013 y sistema SPSS 20 (SPSS. Chicago, IL, USA). Además, se caracterizó el perfil de riesgo de los contaminantes orgánicos volátiles, a partir del desarrollo de un índice de impacto tóxico, basado en el estudio de Cordella *et al.* (2009), donde se consideraron los subíndices presentados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Subíndices utilizados en la obtención del índice de impacto.

Subíndice	Descripción
Toxicidad aguda (TA)	Considera la dispersión de compuestos en la atmósfera y la toxicidad por la exposición a estos compuestos.
Toxicidad crónica (TC)	Considera el peligro en la salud de los humanos, por la exposición prolongada a compuestos emitidos a la atmósfera.
Ecotoxicidad (ET)	Considera el peligro de la emisión de compuestos en la salud de los animales presentes en el ecosistema, tomando como modelo a <i>Daphnia magna</i> .
Carcinogenicidad (C)	Considera el peligro en la emisión de compuestos cancerígenos.

Fuente: Elaboración del autor con información de Cordella *et al.*, 2009

Estos subíndices fueron obtenidos a partir de las formulas presentadas en la Tabla 3. Las formulas a su vez consideran cuatro grupos de propiedades (Tabla 4) y dentro de cada grupo a cada parámetro se le asignó un puntaje de 0 a 3, dependiendo del peligro que

éste representa. Cabe definir que “peligro” en este índice se refiere a las propiedades inherentes de los compuestos que los pueden hacer tóxicos, reactivos o volátiles (SEMARNAP, 2000) (Tabla 5).

Una vez obtenidos los cuatro subíndices se calculó el índice de impacto tóxico (IMT) para cada compuesto individual, representado en la ecuación (7).

$$IMT= TA+TC+TE+C \quad (7)$$

Donde TA representa la toxicidad aguda, TC: toxicidad crónica, TE: ecotoxicidad y C: carcinogenicidad.

Tabla 3. Subíndices que componen el índice de impacto de cada contaminante

Subíndice	Fórmula
Toxicidad aguda (TA)	$1a * 2a (2b+2c)/2$
Eco toxicidad (TE)	$(1b*2d*4a)$
Toxicidad crónica (TC)	$1c*3a*4a$
Carcinogenicidad (C)	$1d*3a*4a$

Fuente: Cordella *et al.*, 2009

Tabla 4. Grupo de propiedades

Grupo de propiedades	Propiedades	Parámetros
1) Toxicológica	1a: toxicidad aguda	LC50, LD50
	1b: ecotoxicidad	LC50, LD50,
	1c: toxicidad crónica	RfD, RfC
	1d: carcinogenicidad	IARC
2)La dispersión y el destino	2a: peso molecular	M
	2b: constante de Henry	H
	2c: punto de ebullición	Tb
	2d solubilidad en agua	S
3)La captación por el organismo	3a: coeficiente de partición agua-octanol	Log Kow
4)Persistencia ambiental	4ª: tiempo general persistencia	TO

LC50: concentración letal 50
LD50: dosis letal 50
RfD: dosis de referencia
RfC: concentración de referencia
IARC: datos de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
M: peso molecular
H: constante de Henry
Tb: punto de ebullición
S: solubilidad en agua
LogKow: coeficiente de partición agua- octanol
TO: tiempo de persistencia, vida-media

Fuente: Cordella *et al.*, 2009

Tabla 5. Propiedades y su clasificación

Propiedades	Parámetros	0	1	2	3
1a.	LC50 (4 h), inhalación rata (mg/l)	>20	2–20	0.5–2	<0.5
1b.	LC50 (48 h), daphnia (mg/l)	>100	10–100	1–10	<1
1c.	RfD (mg/kg d)	–	>0.1	0.001–0.1	<0.001
	RfC (mg/m ³)	–	>0.35	0.0035–0.35	<0.0035
1d.	IARC	Grupo 3-4	Grupo 2B	Grupo 2	Grupo 1
2a.	M (kg/k mol)	–	<100	100–300	<100
2b.	H (atm m3/mol)	–	<10x10 ⁻⁶	10x10 ⁻⁶ –10x10 ⁻²	>10x10 ⁻²
2c.	Tb (C)	–	>150	50–150	<50
2d.	S (mg/l)	–	<1	1–103	>103
3a.	Kow (Log Kow)	–	<3.5	3.5–4.3	>4.3
4a.	TO (h)	–	<100	100–1000	>1000

Fuente: Modificado de Cordella *et al.*, 2009

Cabe mencionar, que en el estudio de Cordella et al. (2009), se consideran los contaminantes secundarios producidos por las reacciones atmosféricas de los compuestos primarios de tal forma que se caracteriza, la mezcla de contaminantes. Debido a la falta de información respecto a los compuestos secundarios emitidos en la zona de estudio y sus propiedades, en este trabajo únicamente se consideró las propiedades toxicológicas de los compuestos reportados en la zona de estudio para calcular el Índice de Impacto Tóxico (IMT).

Para obtener el IMT por localidad (IMT_{Loc}), se sumaron los IMT calculados de cada compuesto (IMT_c) que se han reportado en el RETC por municipio.

$$IMT_{Loc} = \sum_{i=1}^n IMT \quad (8)$$

donde IMT= Índice de Impacto Tóxico y se calcula como la suma de las IMT de cada compuesto.

El IMT se incorporó en un Sistema de Información Geográfica (SIG), empleando ArcGIS (Desktop 10.1; ESRI, Redlands, CA, USA) en forma de símbolos que dependiendo del tamaño y color representaron el efecto potencial (ANEXO-Fig. 3).

En cuanto a la caracterización de confusores en la zona se utilizó la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), sobre la cantidad de población, género y el grado de marginación reportado por municipio (esta información se integró en un SIG) (ANEXO). El grado de marginación, se utiliza en general para representar y diferenciar la desigualdad económica y social de los municipios en el país, tomando en cuenta aspectos como: la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios insuficientes y las relaciones con la residencia en localidades pequeñas (INEGI, 2010; CONABIO, 2010). Por lo que es un factor importante en la caracterización del riesgo ya que dependiendo del grado de marginación una población puede encontrarse más vulnerable, o menos vulnerable a los efectos derivados de la exposición a contaminantes.

Posteriormente para la caracterización de la exposición y dispersión de contaminantes en la zona de estudio, se seleccionó un contaminante modelo que fuera monitoreado por el sensor satelital OMI y que además permitiera observar los patrones de dispersión en la zona. Se seleccionó a los óxidos de nitrógeno (NOx) debido a que prácticamente todos los compuestos a partir de los que se genera, son de origen antropogénico (Grau, 1981), por lo que se cuantificó la densidad de las moléculas estimadas de NOx presentes en la columna troposférica. Para la obtención de los datos por día, se empleó el *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GESDISC) (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI>).

Una vez obtenidos los datos en formato HDF - EOS 5, se utilizó el software IDL® para leer esta información, y con el programa desarrollado por Rivera *et al.*, (2013), se filtró y seleccionaron las variables de interés como: el sitio, el periodo de tiempo y la variación en el rango de densidad de moléculas en la columna (para una mejor visualización del compuesto en la zona). Todo esto para la generación de algoritmos que permitieron desplegar en tiempo y en espacio el promedio de datos para cada año, donde se analizó la dispersión y densidad de las moléculas en la zona.

Para llevar a cabo la localización de las áreas de mayor densidad de moléculas en los mapas de NOx por cada año (Fig.5), se generaron perímetros con Microsoft® PowerPoint 2013, que cubrieron el área de estudio. Esto permitió situar los puntos donde se encontraba una mayor densidad de moléculas (centrómeros) y sus distancias (radios) para generar información (latitud/longitud) que posteriormente alimentó a un SIG y utilizando el programa ArcGIS Desktop 10.1 (ESRI, Redlands, CA, USA), se generaron mapas (con la herramienta “buffer”) de las áreas de mayor exposición por cada año.

Posteriormente se obtuvo el patrón predominante de velocidad y dirección del viento por año en la zona de estudio, con el objetivo de observar si la dispersión de contaminantes obedecía a un patrón de viento dominante. Para ello se descargaron los datos de la estación meteorológica automática Huamantla (EMA). Los datos se procesaron con el programa Grapher 7™, graficando la rosas de los vientos para representar la dirección y velocidad de viento.

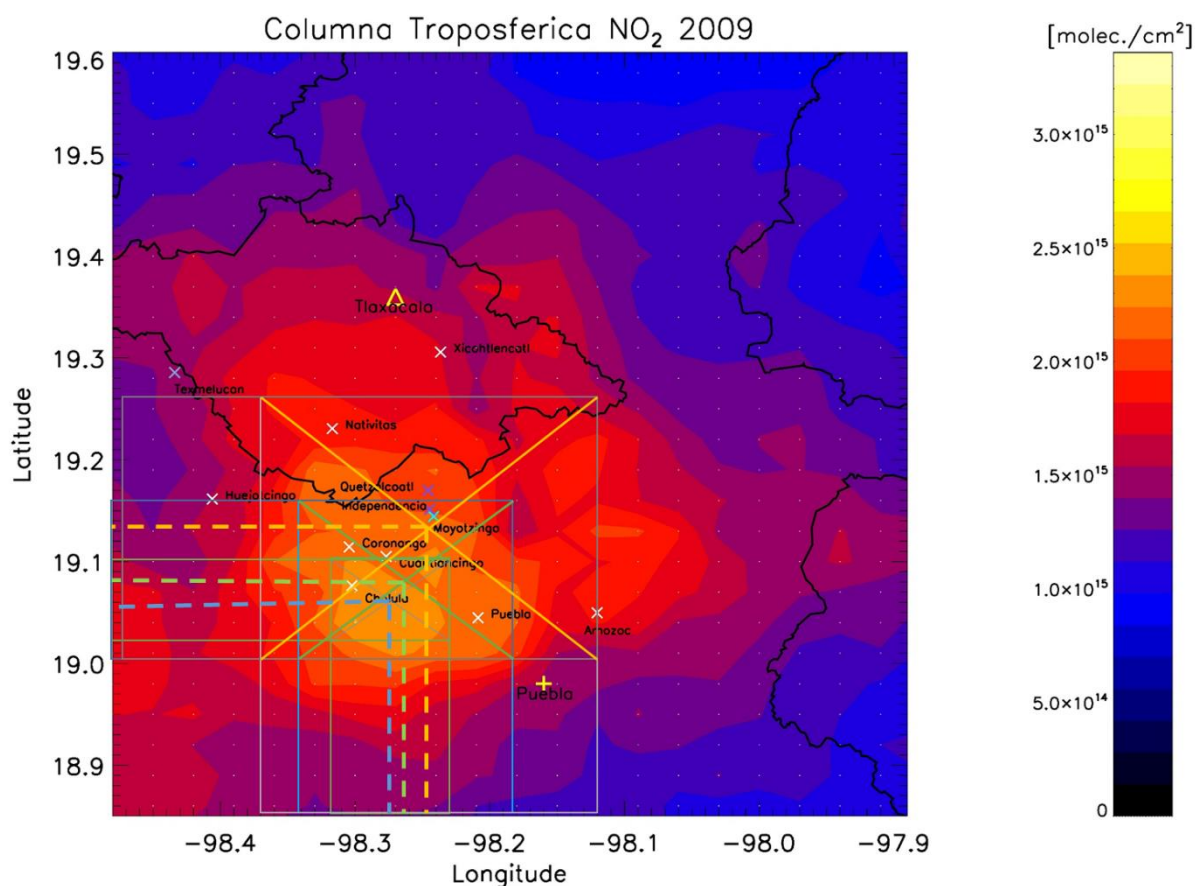


Figura 5. Ubicación de las zonas de mayor exposición.

Finalmente se calculó un índice de riesgo a partir de la información de los contaminantes atmosféricos ya mencionados. El índice se construyó a partir de tres factores: exposición (FEx), confusor (FC) y efecto (FE), a los que se les asignó un mismo peso, es decir, misma importancia para la caracterización del riesgo cuya suma de factores representa un valor igual a 1. El peso de cada factor fue multiplicado por los valores ya obtenidos del Índice de Impacto Tóxico por Localidad (IMT_{Loc}), índice de marginación (IM) y cantidad de moléculas estimadas de NOx en la columna troposférica (DM). La suma resultante generó el índice de riesgo (ver ecuación 9), que a su vez fue clasificado por: riesgo bajo, riesgo medio y riesgo alto, siguiendo el gradiente de resultados obtenido. El índice de riesgo por municipio se integró en el SIG generando un mapa de riesgo por exposición en la región.

$$IR = (IMT_{Loc} * FE) + (IM * FC) + (DM * FEx) \quad (9)$$

6. RESULTADOS

A partir de los datos del RETC se encontró que en el periodo de 2004 a 2012, el giro industrial que reportó en mayor proporción en la zona de estudio fue el giro químico con aproximadamente el 30% de reportes, seguido del automotriz con el 20% y el metalúrgico con el 18 % (Anexo-Fig. 1).

En cuanto al número de industrias que reportaron por municipio en este periodo de tiempo, las industrias de Puebla y Cuautlancingo fueron las más numerosas con 64 y 22 industrias respectivamente (Fig. 6). Cabe señalar que algunas industrias que reportaron en algún periodo dejaron de reportar en otro, por lo que se observó inconsistencias en la frecuencia de reporte de algunas empresas.

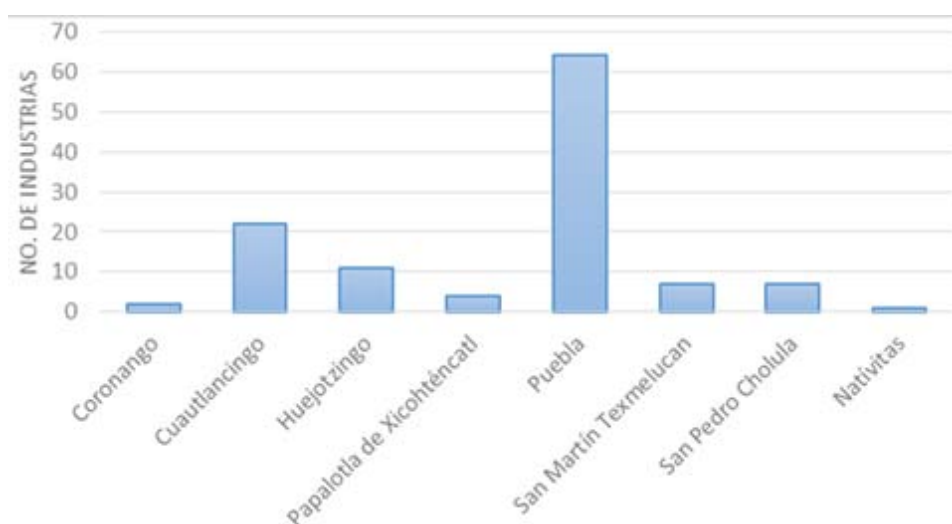


Figura 6. Numero de industrias que reportaron emisiones al aire en el periodo 2004-2012, por municipio en los 8 municipios del área de estudio. Sc. sin coordenadas.

Los reportes realizados por las industrias, de cada compuesto orgánico volátil en la zona se muestran en la Figura 7. El formaldehído (con 19 reportes) y el benceno (con 15 reportes) fueron los principales compuestos orgánicos en la zona. Esto se aprecia además en el volumen de contaminantes emitidos, ya que el formaldehído se emitió en un promedio de 96.79 ± 273.57 ton/año, mientras que el promedio de emisión del benceno fue de 8.7 ± 16.26 ton/año (Fig.8 y Anexo-Tabla 1, 2).

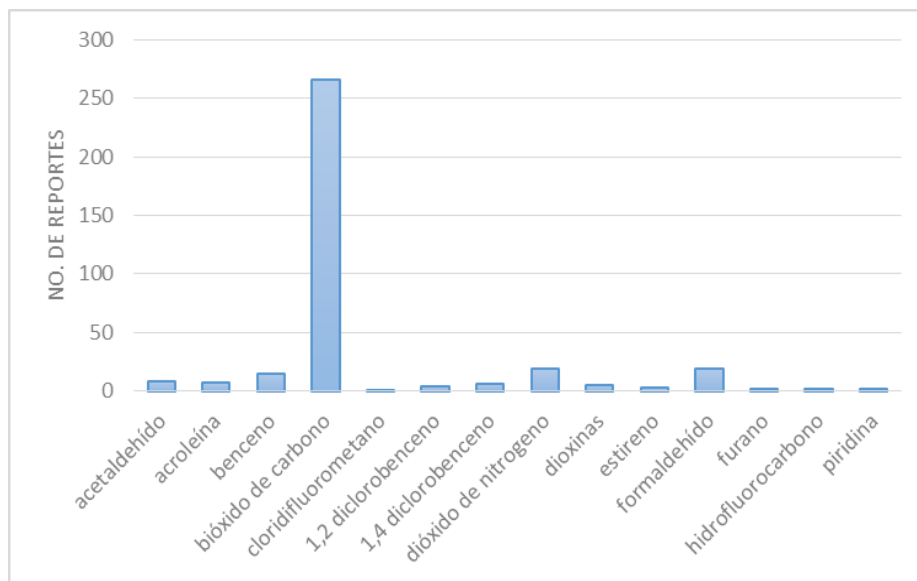


Figura 7. Número de reportes de los compuestos orgánicos volátiles emitidos en la zona de estudio en el periodo 2004-2012.

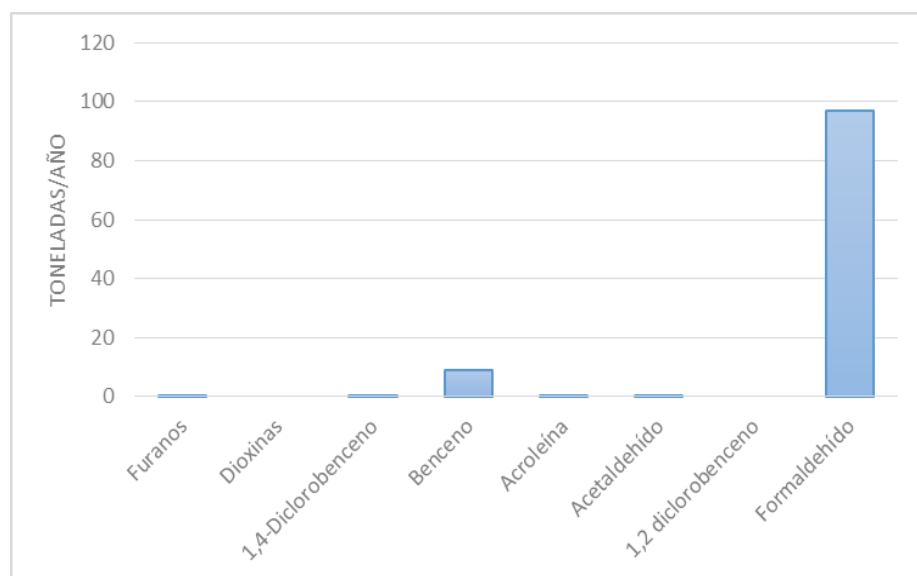


Figura 8. Concentración promedio de compuestos orgánicos volátiles en la zona en el periodo 2004-2012. Los compuestos estireno (con 0.55 ton/ año) y clorodifluorometano (con 2,359 ton/ año) no se consideraron porque solo se reportaron en un año.

Con respecto al impacto de los COV, se observó los compuestos que pueden tener una relación importante en la salud de las poblaciones humanas y animales debido a sus propiedades toxicológicas, carcinogénicas y ecotoxicológicas son los *p*-diclorobencenos (1,2 diclorobenceno, 1,4 diclorobenceno) con un impacto calculado de

20, seguido por el compuesto acroleína con 14, benceno con 10, formaldehído y furano con 8 y por último el fenol con 5 (Tabla 6 y 7). Cabe mencionar que el impacto de los demás compuestos orgánicos volátiles no pudo ser calculado por la falta de datos de algunas de sus propiedades toxicológicas o ecotoxicológicas, pero estos siguen representando un riesgo a la población según los subíndices (Tabla 7). Por ejemplo, la acroleína tiene un puntaje alto en carcinogenicidad (valor=3) y toxicidad crónica (valor=2), lo que significa que los efectos tóxicos están ligados a la persistencia del compuesto en el ambiente y su exposición prolongada puede inducir procesos carcinogénicos.

Al calcular Índice de Impacto Tóxico por localidad, se observó que el municipio de Puebla alcanzó un mayor puntaje con 60 unidades ya que se reportaron al RETC compuestos como formaldehído, fenol, benceno, 1,4 diclorobenceno, estireno y acroleína (Tabla 8, Anexo-Fig 3). Le siguieron los municipios de San Martín Texmelucan con una unidad de 38 (con compuestos como el 1,4 diclorobenceno, formaldehído y benceno) y Cuautlancingo con 32 (con benceno, acroleína y formaldehído). Los demás municipios presentaron un Índice de Impacto Tóxico por localidad bajo como Huejotzingo y Papalotla de Xicohtécatl (valor= 8) o sin valores (debido a la falta de COVS o de datos para calcular el IMT_{Loc}) como los municipios de Nativitas, San Pedro Cholula y Coronango (Tabla 8).

Por otro lado, los mapas generados a partir de la información del sensor OMI nos permitieron observar las variaciones en las condiciones de dispersión regional de los contaminantes troposféricos (Fig. 9). El área de dispersión del NO_x en los ocho años, cubrió la zona metropolitana del Valle de Puebla-Tlaxcala, concentrándose predominantemente en la zona norte de Puebla. Los municipios que presentaron los valores promedio más altos en la densidad de moléculas sobre la columna fueron: Puebla con $2.09 \times 10^{15} \pm 4.4 \times 10^{14}$ moléc/cm², Cuautlancingo con $2.14 \times 10^{15} \pm 5.07 \times 10^{14}$ moléc/cm², Coronango con $2.11 \times 10^{15} \pm 5.16 \times 10^{14}$ moléc/cm² y Cholula con $2.01 \times 10^{15} \pm 5.92 \times 10^{14}$ moléc/cm² (Fig. 9, Tabla 9 y Anexo-Fig. 12). Además, al observar los perfiles verticales (Fig. 9, Tab.9 y Anexo-Fig. 4-11), se aprecia un aumento progresivo en la densidad de moléculas en la zona, que inició en el año 2007 (con un volumen máximo de 1.62×10^{15} moléc/cm²) y continuó hasta el año 2011 (con un volumen máximo

de 3.0×10^{15} moléc/cm²), mientras que en los años 2006 y 2012 la densidad de moléculas en la columna se comportó de forma distinta, ya que en el año 2006 la densidad de moléculas de NO_x aumentó a un máximo de 2.36×10^{15} moléc/cm², en comparación con el año 2005 y 2007 que alcanzaron como máximo las 2×10^{15} moléc/cm². En cambio en el año 2012, a pesar de que la densidad de moléculas siguió siendo elevada con respecto al periodo 2005-2010, ésta disminuyó en comparación al año 2011, presentando una concentración máxima en la densidad de moléculas en la columna de 2.38×10^{15} moléc/cm², abarcando una distancia aproximada por cada nube de 25.3 km en 2011 y 60 km en 2012, cubriendo en ambos casos a los municipios de Coronango, Cautlancingo, San Pedro Cholula, Puebla, Nativitas y las zonas en donde se ubican los corredores industriales Quetzalcóatl e Independencia (Anexo-Fig. 12).

En cuanto a la dispersión de las moléculas de NO_x por el viento en la zona de estudio, el comportamiento a través de los años fue similar, con una velocidad predominante de 5 a 10 km/h con dirección primaria al noroeste (NW) y con una velocidad secundaria de 10 a 20 km/h con dirección hacia el suroeste (SW), lo que podría afectar la acumulación de moléculas en la zona por la recirculación del viento cargado de contaminantes.

Al incluir la información ya descrita en el Índice de Riesgo (Tabla 10 y 11), se obtuvo que los municipios de Puebla y Cautlancingo son las zonas con un mayor riesgo de exposición a contaminantes atmosféricos, seguidos por San Martín Texmelucan con un índice de riesgo medio y por último los municipios de Coronango, San Pedro Cholula, Huejotzingo, Papalotla de Xicohtécatl y Nativitas (Tabla 11). El mapa de Riesgo por municipio se muestra en la Figura 11.

Tabla 6. Propiedades físico-químicas, toxicológicas y carcinogénicas de los compuestos orgánicos volátiles.

Compuesto	Peso Molecular (kg/k mol)	Ley de Henry a 25º (atm m³/mol)	Punto de Ebullición (ºC)	Solubilidad en agua (mg/L)	Log kow (Coeficiente de partición Octanol/Agua)	Tiempo de persistencia total aire vida-media (h)	Tiempo de persistencia total agua vida- media (h)	Dosis de referencia (RFD) (mg/kg-día)	Concentración de referencia (RFC) (mg/kg-día)	Concentración letal 50 (LC50) en Daphnia magna a las 48h (mg/L)	Concentración letal 50 (LC50) Inhalación en rata a las 4 horas (mg/l)	Clasificación IARC
Acetaldehído	44.05	0.0000667	20.1	1x10 ⁶	0.34	24	30-100		0.009		1498.28	2B (posible cancerígeno)
Acroleína	56.06	5,5600	52.6	2,770	0.01	10	30-100	0.0005		0.083	7.39	3 (no cancerígeno)
Benceno	78.11	0.00556	80.08	1,790	2.13	312	2.7	0.004		200	44.5	1 (cancerígeno)
Bifenilos Policlorados	291.98 a 360.86	2.8	375	Muy baja	3.76			0.00007		0.003		2 (probable cancerígeno)
Clorodifluorometano	86.469	0.0294	-40.8	2,770	1.08	82,344	2.7		50	433		
1,2-Diclorobenceno	147	0.00192	180.3	155.8	3.43	576	4.4	0.09		0.233	5.6	3 (no cancerígeno)

Fuente: Elaboración del autor a partir de datos de EPA, TOXNET y ECOSAR (US EPA, 2009)

Tabla 6. Propiedades físico-químicas, toxicológicas y carcinogénicas de los compuestos orgánicos volátiles (Continuación).

Compuesto	Peso Molecular (kg/k mol)	Ley de Henry a 25 ^o (atm m ³ /mol)	Punto de Ebullición (°C)	Solubilidad en agua (mg/L)	Log kow (Coeficiente de partición Octanol/Agua)	Tiempo de persistencia total aire vida-media (h)	Tiempo de persistencia total agua vida-media (h)	Dosis de referencia (RFD) (mg/kg-día)	Concentración de referencia (RFC) (mg/kg-día)	Concentración letal 50 (LC50) en Daphnia magna a las 48h (mg/L)	Concentración letal 50 (LC50) Inhalación en rata a las 4 horas (mg/l)	Clasificación IARC
1,4-Diclorobenceno	147.0	0.00241	174	79	3.44	576	24 a 744	0.03		2.2	0.82	2B (posible cancerígeno)
Hidrofluorocarbonos	66.1		-25	0.28					40	11.7		
Fenol	94.11	0.00000333	181.75	66,666.66	1.46	2.28 a 22.8	5.3 a 56.5	0.3		17	6.32	3 (no cancerígeno)
Formaldehído	30	0.000000337	-19.5	20	0.35	0.3 a 0.5	36	0.2		289.407	0.578	1 (cancerígeno)
Furanos	68.08	0.0054	32	1,000	1.34	0.47 a 4.72	168 a 672	0.001		111.86	0.601	2B (posible cancerígeno)
Piridina	79.10	0.00011	115.2 a 115.3	100,000	0.65	24	72	0.001			3995.43	3 (no cancerígeno)

Fuente: Elaboración del autor a partir de datos de EPA, TOXNET y ECOSAR (US EPA, 2009)

Tabla 7. Matriz de impacto calculada para cada COV presente en la zona.

Compuesto	1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3a	4a	TA	ET	TC	C	Impacto
Acetaldehído	0			1	1	2	3	3	1	1	0			1	
Acroleína	1	3	3	0	1	2	2	3	1	1	2	9	3	0	14
Benceno	0	0	2	3	1	2	2	3	1	2	0	0	4	6	10
Bifenilos Policlorados	3	3	2	2	3	1		2							
Clorodifluorometano	0			1	3	2	3	1	3		0				
1,2-Diclorobenceno	1	3	2	0	2	2	1	2	1	2	3	12	4	0	19

Tabla 7. Matriz de impacto calculada para cada COV presente en la zona (*continuación*).

Compuesto	1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3a	4a	TA	ET	TC	C	Impacto
1,4-Diclorobenceno	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	6	8	4	2	20
Hidrofluorocarbonos	1			1		2	1								
Fenol	1	1	1	0	1	1	1	3	1	1	1	3	1	0	5
Formaldehído	2	0	1	3	1	1	3	3	1	1	4	0	1	3	8
Furanos	2	0	2	1	1	2	3	3	1	1	5	0	2	1	8
Piridina	0	3	2	3	1	2	2		1	1	6		2	3	

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 8. Índice de Impacto Tóxico por localidad.

Municipio	$IMT_{Loc} = \sum_{i=1}^n IMT$	IMT_{Loc}
Coronango	-	-
Cuatlancingo	10+14+8	32
Huejotzingo	8	8
Papalotla de Xicohtécatl	8	8
Puebla	5+8+10+14+19+10	66
San Martín Texmelucan	20+10+8	38
San Pedro Cholula	-	-
Nativitas	-	-

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 9. Concentración de moléculas de NOx en la columna en el periodo 2005-2012

Municipios	2005*	2006*	2007*	2008*	2009*	2010*	2011*	2012*	$\bar{x} \pm d\bar{s}^*$
Coronango	1.62	2.36	1.62	1.88	2.5	2.5	2.88	1.5	2.11 ±5.16
Cuatlancingo	1.62	2.36	1.62	2.0	2.5	2.38	3.0	1.62	2.14 ±5.07
Huejotzingo	1.62	1.5	1.5	1.62	1.76	1.76	2.0	2.26	1.75 ±2.62
Papalotla de Xicohtécatl	1.26	1.5	1.38	2.0	1.76	1.76	1.8	1.74	1.66 ±2.54
Puebla	1.5	2.36	1.62	2.0	2.5	2.38	2.76	1.62	2.09 ±4.43
San Martín Texmelucan	1.5	1.5	1.38	1.38	1.5	1.5	1.74	1.88	1.55 ±1.74
San Pedro Cholula	1.62	1.5	1.62E	1.62	2.62	2.5	3.0	1.62	2.01 ±5.92
Nativitas	1.5	2.0	1.38	1.5	1.88	1.88	2.38	2.38	1.86 ±3.87

Fuente: Elaboración del autor

* Todos los datos están expresados a la 10⁺¹⁵

Tabla 10. Rango de riesgo

Rango	Riesgo
1-9	Bajo
10-19	Medio
≥ 20	Alto

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 11. Índice de riesgo

Municipios	Índice de riesgo
Coronango	1.02
Cuatlancingo	23.47
Huejotzingo	3.92
Papalotla de Xicohtécatl	3,89
Puebla	22.79
San Martín Texmelucan	13.71
San Pedro Cholula	1.32
Nativitas	1.60

Fuente: Elaboración del autor con datos del RETC

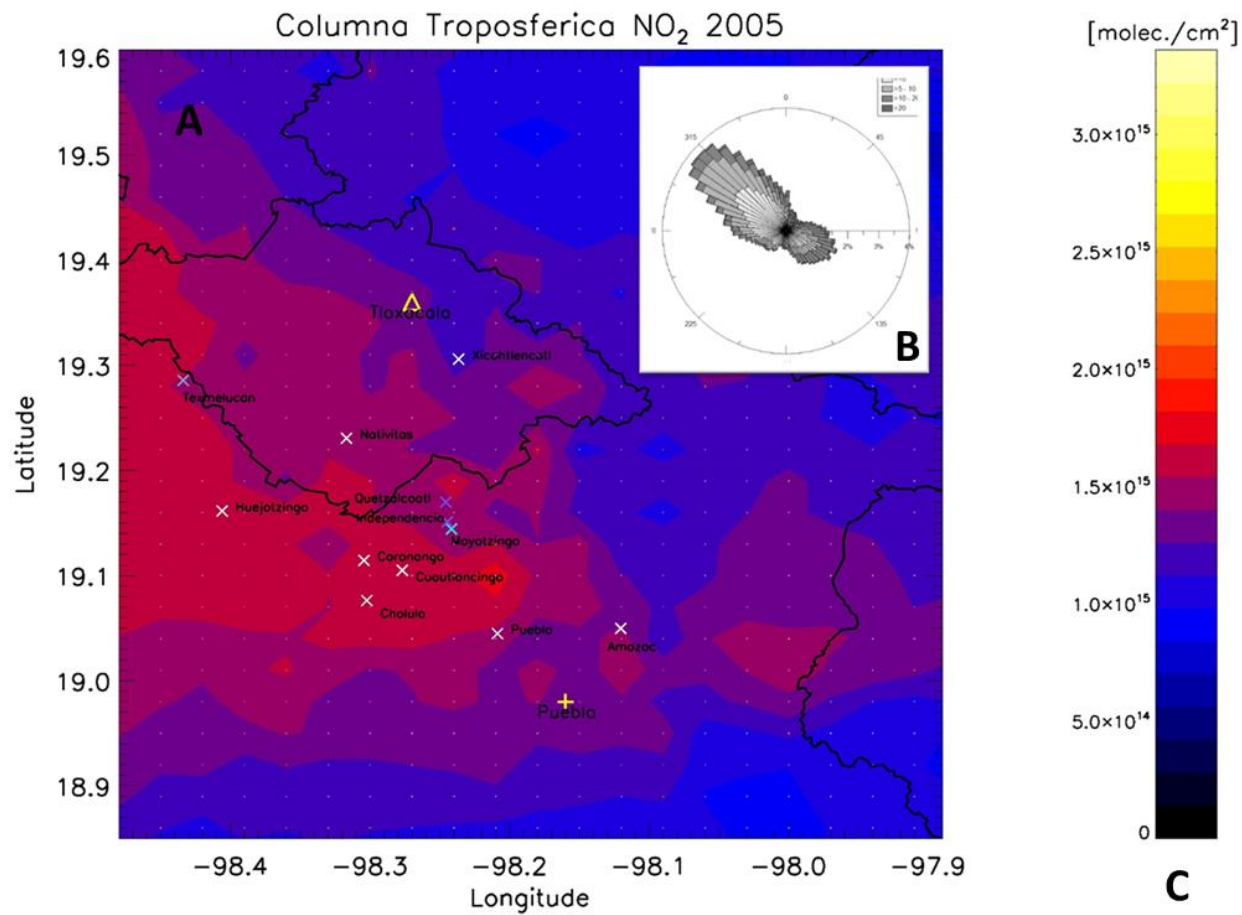


Figura 9. Dispersión promedio de contaminantes para el año 2005, construida a partir de las mediciones del instrumento OMI. (A) forma de transporte y dispersión de moléculas, (B) rosa de los vientos, se muestra la dirección primaria del viento, NW a una velocidad predominante de 5 km/h, (C) escala de distribución de moléculas sobre columna vertical.

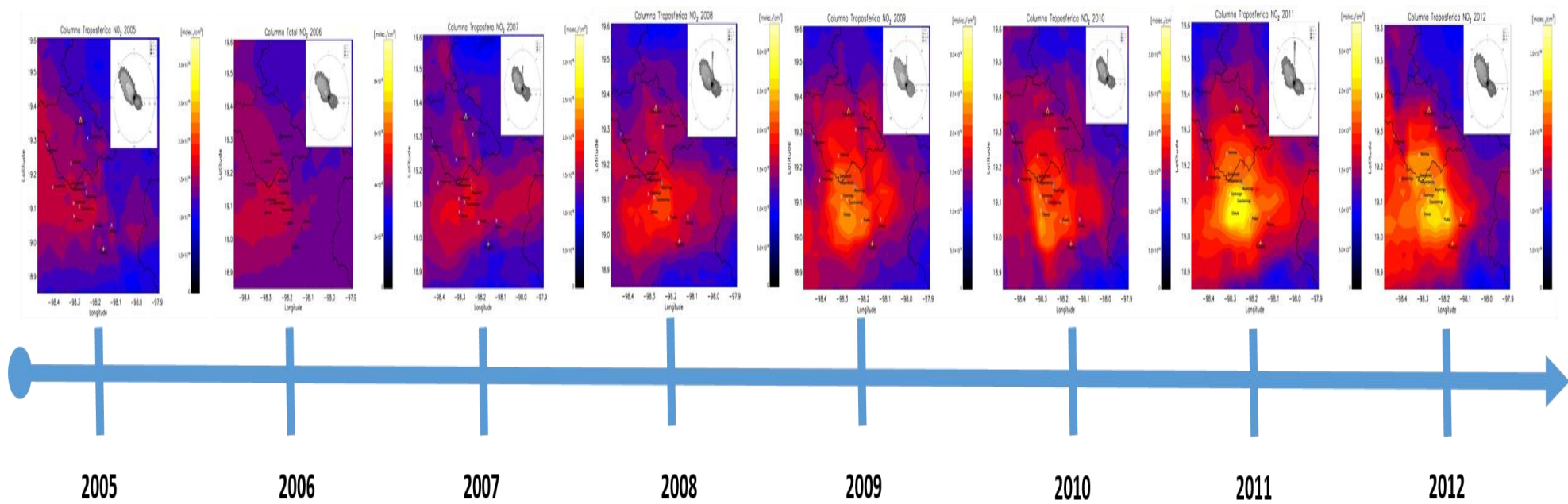


Figura 10. Patrón en la dispersión promediada de la densidad de moléculas de NOx para el periodo 2005-2012 (mapas a mayor escala en anexo).

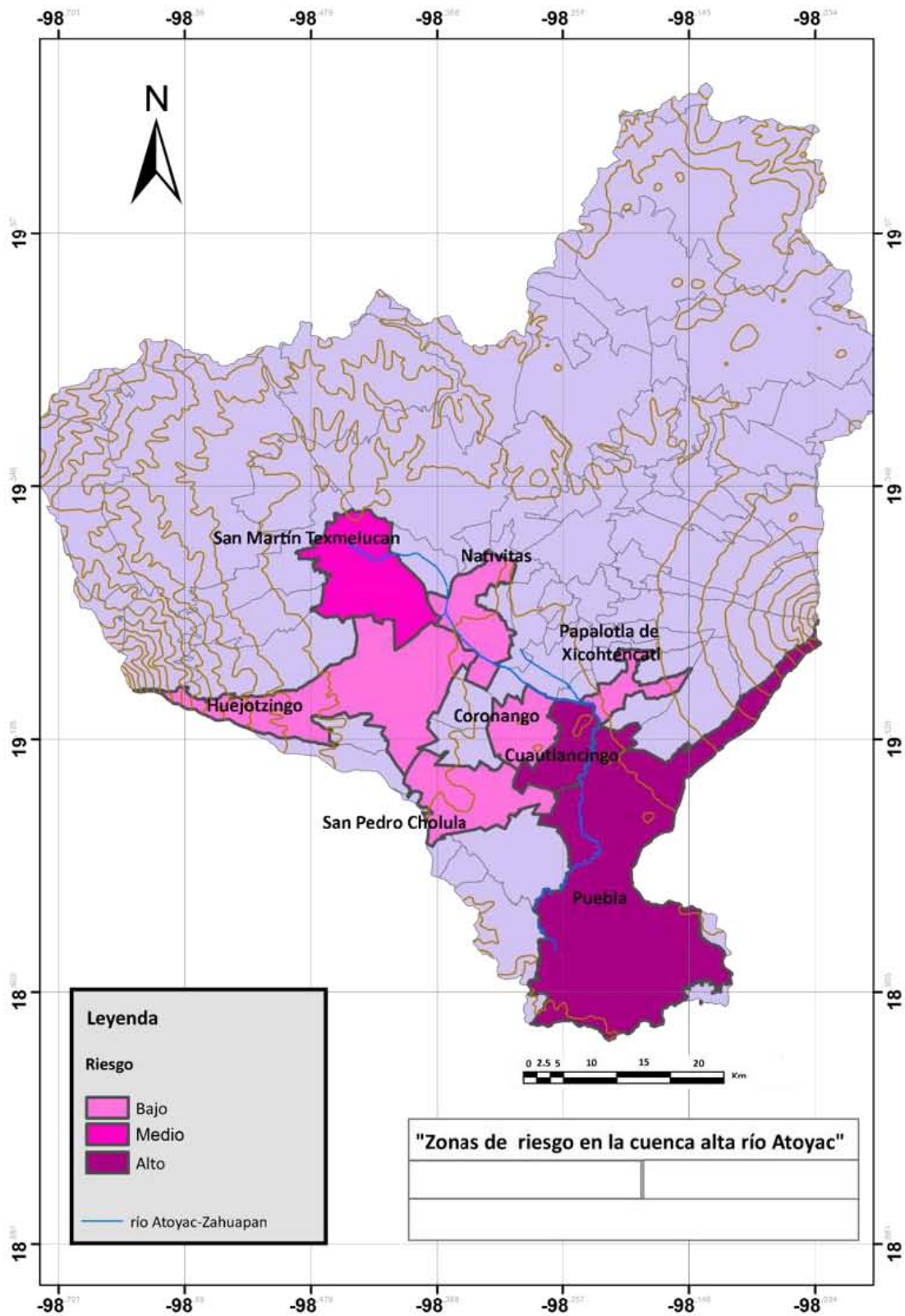


Figura 11. Mapa de Riesgo por exposición a contaminantes en la Cuenca alta río Atoyac. Clasificación con base en los rangos presentados en las Tablas 9 y 10.

7. DISCUSIÓN

Los distintos programas de monitoreo para los estudios de evaluación de riesgo de exposición a contaminantes se basan en métodos costosos como los ya descritos en el apartado tres de la introducción, ya que la mayoría requieren personal capacitado o sistemas de monitoreo muy complejos. En cambio el método propuesto en este trabajo se basó en la utilización de sistemas de percepción remota, sistemas de información geográfica e indicadores de peligro y riesgo para hacer una caracterización preliminar de los posibles riesgos por exposición a contaminantes atmosféricos. Esta propuesta puede representar una opción para la toma de decisiones rápida y de bajo costo para el monitoreo de contaminantes atmosféricos y los efectos potenciales de la contaminación. En esta sección discutiremos los resultados obtenidos en la caracterización del efecto, caracterización de confusores y caracterización de la exposición para finalmente abordar la caracterización del riesgo, todo esto contrastado con estudios a nivel local y mundial.

En México, anualmente se generan aproximadamente ocho millones de toneladas de contaminantes emitidos por parte de las industrias al año. Los principales compuestos emitidos a la atmósfera por las industrias son los dióxidos de sulfuro, compuestos orgánicos volátiles y distintos hidrocarburos (Jenkis y Mercado, 2008). En el análisis realizado al evaluar los datos del Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes se observó que las principales industrias que reportan al registro en la zona de estudio, son la industria química con el 30% de reportes, seguida de la automotriz con el 20%. Esta última es de gran importancia en México, ya representa el segundo sector económico más importante del país, pero también contribuye con un volumen importante de contaminantes a la atmósfera como los dióxidos de carbono, PM10 y los compuestos orgánicos volátiles (Vicencio, 2007, Daud *et al.*, 2010).

Los municipios con más industrias que reportan al RETC en la zona de estudio son Puebla y Cuautlancingo con 64 y 24 industrias respectivamente, lo que es de gran relevancia ya que en estos municipios se concentra el 80% de las industrias del estado de Puebla (Zuk *et al.*, 2007). Aun así, los reportes no fueron suficientes ya que existen inconsistencias en la frecuencia de reportes, probablemente debido al carácter

voluntario del reporte en el periodo de análisis ya que a partir de 2013 se modificó la Norma Ambiental y es hasta ahora de carácter obligatoria. Por otro lado, se debe considerar que la NOM-165-SEMARNAT-2013, establece para cada contaminante un umbral de reporte, lo que ocasiona que tanto medianas como pequeñas industrias queden exentas al cumplimiento de dicha Norma Ambiental.

En la zona se reportó la presencia de 12 distintos compuestos orgánicos volátiles (ver tabla 6), que de acuerdo con el índice de impacto que se obtuvo representan un peligro a la salud por su presencia en la atmósfera. Por ejemplo, el formaldehído es uno de los contaminantes que se reportó en mayor cantidad con un volumen de 96.79 ± 273.57 ton/año. De acuerdo con los resultados, presenta un subíndice de carcinogenicidad elevado, que podría estar asociado con la incidencia de leucemia mieloide según los estudios de Zhang et al. (2010) y Scwilk et al. (2010). Otro compuesto que preocupa es el benceno pues se emite en volúmenes de 8.77 ± 16.29 ton/año, de acuerdo con el subíndice de toxicidad crónica (valor= 4) y carcinogenicidad (valor=6), siendo este último el subíndice más elevado en comparación con los demás compuestos examinados, ya que se sabe que la exposición crónica a este compuesto puede ocasionar problemas en el desarrollo neurológico en los niños, así como una disminución en el número de eritrocitos, leucocitos y trombocitos, afectando a su vez a la médula ósea y generando diversos tipos de cáncer entre ellos leucemia (Snyder., 2012; Guxens *et al.*, 2012).

Además, en la zona se emite p-diclorobenceno, éste representa un peligro mayor a la salud, a pesar de que no se ha comprobado que exista una relación directa entre la exposición a estos compuestos y el efecto en la salud de las personas que lo inhalan. Sin embargo, se ha demostrado que gran parte de la población en el mundo presenta en la orina el metabolito 2,5-diclorofenol y se ha reportado la presencia de este compuesto en los tejidos, lo que podría estar relacionado a la aparición de cánceres (Hill *et al.*, 1995; Yoshida *et al.*, 2002; Chin *et al.*, 2012). En la zona este compuesto se libera en un promedio de 0.008 ± 0.01 ton/año.

Respecto a la acroleína, ésta representa un compuesto con un valor alto de ecotoxicidad, así como de toxicidad crónica, siendo además un compuesto peligroso

para la salud humana. Existen estudios que mencionan las propiedades alquilantes sobre el DNA del epitelio bronquial, además se ha observado que la exposición a bajas dosis puede generar muerte celular y a altas dosis cáncer, esto último contrastando con nuestro estudio en donde no se encontró un índice elevado para carcinogenicidad (Keher *et al.*, 2000; Sánchez., 2012).

Respecto al estireno, éste tiene un índice de impacto igual al del benceno con 10 unidades y toxicidad aguda de 4 unidades. Cuando las personas están expuestas de manera aguda, los síntomas que se presentan a bajas concentraciones son dolor de cabeza, náuseas, vómito y debilidad. En un estudio llevado a cabo en el Centro y Este de Europa se concluyó que la exposición constante y acumulada de estireno podría estar relacionada con la incidencia de cáncer de riñón (Karami *et al.*, 2012). Aunque esto último difiere con el estudio realizado por Boffeta *et al.* (2009) en donde no encuentran ninguna asociación entre la exposición a estireno y el desarrollo de cualquier tipo de cáncer.

En cuanto a los compuestos bifenilos policlorados, acetaldehído, clorodifluorometano e hidrofluorocarbonos no se pudo generar el índice de impacto debido a que actualmente no se cuenta con la información toxicológica necesaria para obtener los cuatro subíndices (ver tabla 6). Lo anterior es un problema que se tiene a nivel mundial con las sustancias químicas, ya que de los 12 millones de sustancias que se encuentran en el planeta, solo 100,000 se utilizan en el comercio, de las cuales menos de tres mil se producen en volúmenes superiores a una tonelada en más de un país. Sin embargo, esto representa alrededor del 90% del total de sustancias que se comercian y de este total solo se han regulado a nivel mundial ocho mil sustancias en lo que se refiere a su etiquetado y con base a alguna propiedad que las hace peligrosas, por lo que actualmente no se han realizado estudios sistemáticos de la peligrosidad de la mayoría de sustancias para la salud humana y los ecosistemas (SEMARNAP, INE, 2000).

Para el caso de la piridina se obtuvieron algunos índices como el índice de toxicidad crónica, aguda y de carcinogenicidad. Este compuesto presentó junto con el benceno el valor más alto de toxicidad aguda (valor= 6), además de ser un compuesto con un subíndice de carcinogenicidad medio (valor= 3) y con una toxicidad crónica baja

(valor=2). Por otro lado, el acetaldehído presentó valores bajos en los únicos índices que se pudieron calcular.

Debido a que los índices de impacto solo muestran el peligro de los compuestos al ambiente y a la salud de manera individual, se calculó un Índice de Impacto Tóxico por localidad, que permitió determinar por municipio la peligrosidad de la mezcla de emisión de compuestos orgánicos volátiles. Si bien este índice no contempla las interacciones secundarias que pueden tener estos compuestos entre ellos mismos y con otros compuestos presentes en la atmósfera, está asociada a los posibles efectos fisiológicos de tipo aditivos en la salud (Godish., 2004). Lo anterior porque podría estar ocurriendo que las sustancias que producen el mismo efecto en la salud humana estén siendo acumuladas, en el caso del municipio de Cuautlancingo, los compuestos presentes fueron la acroleína, el benceno y el formaldehído, los dos últimos clasificados como posibles carcinogénicos.

En el municipio de Puebla se emiten mezclas de benceno, acroleína, 1,2 diclorobenceno, formaldehído, estireno y fenol, lo que podría estar generando efectos aditivos en la salud de la población. En el municipio de San Martín Texmelucan se presentó un IMT= 32, más bajo que en los anteriores dos municipios, pero el mismo efecto podría estar ocurriendo con los compuestos benceno, acroleína y formaldehído presentes en esta zona. En un estudio realizado por Cassee et al. (1996), se midió la disminución en la frecuencia de respiración en ratas macho Wistar expuestas a los compuestos acroleína, acetaldehído y formaldehído en forma de mezcla y por separado, observando que el efecto en la disminución en la frecuencia de respiración era mayor al exponer a las ratas a la mezcla (efecto aditivo), que al exponer a las ratas a los compuestos individuales.

En cambio Huejotzingo solo obtuvo un IMT = 8, pero se debe tener en cuenta que también se reportó la presencia de dioxinas que al igual que los furanos; son compuestos altamente persistentes en el medio ambiente, y sustancias potencialmente cancerígenas para los humanos, además de ser disruptores endocrinos y neurotoxinas (Godish., 2004). En cuanto al municipio de Xicotécatl se obtuvo IMT = 8, al igual que

Huejotzingo pero en este caso la presencia de formaldehído contribuyó en la IMT del municipio.

Para observar posibles efectos en la salud de los pobladores relacionados con la exposición a estos compuestos, se debe tener en cuenta que influyen distintos factores. Por ejemplo, la predisposición genética, el ser fumador, el grado de marginación, entre otros. En este estudio se consideró el grado de marginación que presentan los municipios en la zona con base a lo reportado en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Al respecto hay que tener en cuenta que los municipios presentes en la zona poseen un nivel de marginación bajo o medio lo que significa según el INEGI en 2010, es que las poblaciones tiene acceso a una educación básica, poseen viviendas dignas y tienen una estabilidad económica. Lo anterior se podría relacionar con una disminución en el riesgo por exposición a contaminantes ya que contarían con acceso a servicios médicos e información que les permitiera prevenir los riesgos de exposición. A pesar de esto, se observa que esta metodología podría no reflejar la verdadera situación de algunas poblaciones pues en el mismo año, el CONEVAL reportó que la mitad de la población para esta zona no contaba con seguridad social. En este sentido Puebla, Cuautlancingo y Nativitas serian municipios en donde aún existen grupos poblacionales con una alta marginación, lo cual es apoyado por Paniagua (2008) quién señala que históricamente estas ciudades poseen un desarrollo agrícola e industrial, aunque la primera actividad está disminuyendo a causa de la industrialización y urbanización lo cual, ha generado que la economía no sea estable y se encuentren grupos con una mayor estabilidad económica que otros. Asimismo, se deben considerar los estudios que se han realizado sobre exposición a contaminantes, donde las poblaciones que se encuentran fuera de riesgo tienen un índice de marginación bajo y además viven alejados de las fuentes de emisión de contaminantes, por lo que la población bajo estudio se encontraría más vulnerable a los efectos de la contaminación atmosférica ya que la mayor parte de la población son trabajadores de las mismas industrias que no solo están expuestos a contaminantes dentro de las instalaciones, sino que además viven cerca de las fuentes de emisión de contaminantes (Arias,2002). También cabe señalar que las zonas donde el crecimiento industrial es mayor, hay una mayor densidad de población

como es el caso de Puebla, Cuautlancingo, San Pedro Cholula y San Martín Texmelucan (Pérez, 2005) (Anexo-Tabla 4).

Hay que señalar que en cuestión de riesgo una población con un nivel marginación alto está más expuesto a enfermarse. En un estudio realizado por Santos (2015), respecto la pobreza y marginalidad como criterio de priorización para enfermedades catastróficas de México, observó que existe una marcada relación entre las entidades con un bajo desarrollo económico y las enfermedades fatales como el cáncer.

También se ha asociado el nivel económico y el tipo de origen geográfico de las diferentes poblaciones humanas, con la exposición a contaminantes por ejemplo en Estados Unidos. En los estados de Arizona y Phoenix se observó que las poblaciones que presentaban una elevada exposición a los contaminantes eran latinos con menores recursos económicos y que vivían cerca de las fuentes de contaminación, esto también es apoyado por estudios donde se relacionan el nivel de marginación y el origen geográfico con la contaminación atmosférica de NOx, señalando que los niños de color distinto al blanco y con menor recursos económicos muestran una mayor exposición a este tipo de contaminantes (Grineski *et al.*, 2007; Clark *et al.*, 2014).

En cuanto a la exposición a contaminantes, distintos estudios han señalado que los grupos que se encuentra más vulnerables ante los contaminantes son las mujeres y los niños (Miller *et al.*, 2007; Aguilera *et al.*, 2013). Es importante señalar que dentro de la cuenca se encuentra una mayor proporción de mujeres que de hombres, además el papel de la mujer ha cambiado ya que ahora además de desempeñar tareas del hogar, también trabajan en las ciudades dentro de las fábricas o vendiendo productos cerca de éstas, lo que hace que estén más expuestas a contaminantes atmosféricos dentro y fuera de su vivienda (Paniagua., 2008). Esto concuerda con la revisión realizada por Catalán- Vázquez y Riojas-Rodríguez en 2015, en el municipio de Huejotzingo, en una comunidad cercana al corredor industrial Quetzalcóatl, donde se encontró una relación directa entre la exposición a contaminantes y el género, ya que las mujeres que se encontraban cercanas al corredor industrial presentaron daños genotóxicos en el DNA, debido a que tienen una exposición más alta que los hombres, ya que ellos suelen salir

a trabajar a otros municipios y no están continuamente expuestos a los contaminantes. Otro hecho que apoya la presencia de enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica en la zona, son los diversos estudios que demuestran la relación existente entre las enfermedades respiratorias y daño genotóxico por la exposición a contaminantes atmosféricos entre ellos los compuestos orgánicos volátiles (Romano, 1999; Zamora *et al.*, 2000; Montero *et al.*, 2006; SEMARNAT, Puebla, 2006).

En cuanto a la dispersión de contaminantes en la zona se observó que las características físicas de la cuenca no representan una barrera para la dispersión de los contaminantes ya que el terreno no tiene considerables elevaciones. De tal manera que la acumulación visible de NO_x en la troposfera se puede deber a distintos factores entre ellos la constante emisión de este compuesto durante todo el año aunado al efecto conocido como inversión térmica, que se basa en el aumento de temperatura en las capas altas de la atmósfera y que es importante en la acumulación de moléculas debido a que impide la dispersión en altura y provoca que estas se mantengan a nivel de superficie (Casal., 1999). Además, el comportamiento de viento podría afectar la acumulación de moléculas en la zona, por la recirculación de partículas cargadas de contaminantes que van del noroeste hacia el suroeste con una velocidad de 5 a 10 km/h chocando con los vientos que presentan una dirección contraria, a una velocidad de 10-20 km/h. De tal manera, se forma un estado estacionario de la nube de dispersión de contaminantes en la cuenca.

Los principales municipios en donde se observó una mayor acumulación de moléculas sobre columna fueron Cuatlancingo con un promedio de $2.14 \times 10^{15} \pm 5.08 \times 10^{14}$ moléc/cm², Puebla con un promedio de $2.09 \times 10^{15} \pm 4.43 \times 10^{14}$ moléc/cm², San Pedro Cholula con un promedio de $2.01 \times 10^{15} \pm 5.93 \times 10^{14}$ moléc/cm² y Coronango con un promedio de $2.11 \times 10^{15} \pm 5.16 \times 10^{14}$ moléc/cm². Sin embargo, al comparar estos resultados con los reportes de la emisión de NO_x por parte de la industria en esta zona, se observó que los reportes son bajos o nulos con el paso del tiempo, solo en el año 2008 se reportó la emisión de dióxido de nitrógeno en un volumen de 99.0426 ton/año, por lo que otras fuentes de emisión de NO_x pudieron contribuir con el aumento de la densidad de moléculas en estos municipios. Por ejemplo, la emisión de NO_x por parte de las fuentes móviles podría ser la explicación para el aumento y concentración de

moléculas sobre la columna en la zona. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la motorización y el uso de los automóviles ha contribuido con el 85% de la contaminación en la zona (Puebla, 2013, OCDE, 2013). Para el año 2010, el total de vehículos registrados en el estado de Puebla fue de 1 199,518, donde el 96% de estos vehículos eran particulares y solo el 4% públicos. En términos de motorización, la tasa del Estado de Puebla para este año fue de 1 vehículo por 5 habitantes, mientras que en la zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala hay 1 vehículo por cada 4 habitantes (Puebla, 2013).

Además, según lo reportado por el programa Pro-Aire (2010), los municipios que emiten un mayor volumen de dióxido de nitrógeno por año son: Cuautlancingo (con 343 ton/año), Puebla (250 ton/año), Coronango (4.4 tons/año), coincidiendo con los datos de dispersión de los municipios que mostraron un aumento en la densidad de moléculas en la columna troposférica. Lo anterior podría al mismo tiempo reflejar la contribución de la vialidad existente entre estos municipios y la densidad de NOx en la zona (Ibáñez, 2002; Hernández–Flores *et al.*, 2009).

Como se ha visto a lo largo del trabajo, los factores considerados (efecto, exposición y marginación) han desempeñado un papel fundamental para interpretar el patrón de comportamiento del índice de riesgo ambiental y de salud en la Cuenca Alta Atoyac, ya que por medio de la integración de esta información, se logró caracterizar las zonas que poseían un mayor riesgo por exposición a contaminantes atmosféricos, siendo los municipios de Puebla y Cuautlancingo los que presentaron un mayor índice de riesgo. En Puebla, el riesgo aumentó debido a que se reporta la presencia de un mayor número de compuestos orgánicos volátiles en la zona y una mayor densidad de moléculas de NOx en comparación con los demás municipios, lo que elevó el riesgo a pesar de que el grado de marginación de la población residente era muy bajo. En cambio, en el municipio de Cuautlancingo, la presencia de compuestos orgánicos volátiles fue menor en comparación con Puebla, pero presentó la mayor densidad de moléculas de NOx sobre columna y además su población está categorizada en un nivel de marginación medio, por lo que su índice de riesgo es elevado. En cuanto al municipio de San Martín Texmelucan, este mostró un índice de riesgo medio, debido a que no presentó una elevada densidad de moléculas a lo largo del tiempo, pero obtuvo un

$IMT_{Loc} = 38$. En cuanto a los demás municipios se categorizaron en un nivel de riesgo bajo debido a que no alcanzaron unidades tóxicas elevadas ya que no se pudo caracterizar su IMT_{Loc} atmosférica o fue muy baja (como el caso de Papalotla y Huejotzingo), además todos estos municipios se localizaron en zonas de baja marginación (excepto Nativitas), lo que generó un puntaje bajo en riesgo.

8. CONCLUSIONES

Con respecto a la densidad de moléculas sobre columna, el dióxido de nitrógeno presentó valores más altos principalmente en municipios como Puebla, Cuautlancingo, Huejotzingo y Coronango. Esto fue relevante ya que en estos municipios se ubica el 80% de la industria en Puebla y además están unidos por importantes vialidades.

Los principales compuestos orgánicos volátiles que se identificaron en la industria y que representan un impacto negativo en la salud de las poblaciones cercanas a la industria son los p-diclorobenceno, benceno, acroleína, estireno y fenol. Los cuales se encuentran presentes en la mezcla toxicológica de los municipios. Mediante el cálculo IMT_{Loc} se identificó que los municipios de Cuautlancingo, Puebla y San Martín Texmelucan han presentado valores más altos en comparación a los demás municipios analizados.

En cuanto al grado de vulnerabilidad de cada municipio, Cuautlancingo y Nativitas presentaron niveles de marginación media de acuerdo con INEGI. Lo anterior es un aspecto que deberá considerarse como un componente importante en los estudios de riesgo ambiental, ya que juega un papel importante en las características de las poblaciones sujetas a factores de riesgo por exposición a contaminantes.

Los resultados obtenidos en cada prueba realizada en la zona se integraron en un índice, que permitió la identificación de los principales municipios en riesgo de exposición, en su orden: Cuautlancingo, Puebla y San Martín Texmelucan.

Finalmente con este estudio se elaboró un mapa de riesgo que puede ser usado como base para el diseño de estudios eco-epidemiológicos, así como implementar un sistema de vigilancia de calidad de aire en la cuenca alta del río Atoyac.

9. CONSIDERACIONES FINALES

Los reportes de emisiones de contaminantes para la cuenca en general son escasos en el periodo de años revisados debido a que previo a la modificación de la NOM-165-SEMARNAT-2013, el RETC era de carácter voluntario y las industrias no reportaban de manera periódica. Asimismo, una de las consideraciones en el uso de inventarios de emisión de contaminantes atmosféricos es que no incluyen a todas las sustancias químicas con efectos adversos a la salud que se emiten desde fuentes fijas. Además, la UNITAR (2004) ha señalado que en México, los datos de fuentes móviles de emisión no son considerados en los inventarios atmosféricos, particularmente de autotransportes, estaciones de gas natural, actividades agrícolas y mineras.

Otra consideración para este estudio es, que debido a la falta de datos de las propiedades toxicológicas en humanos de los COVs (EC50 y LC50) no se pudo calcular con precisión la toxicidad, por lo que se utilizó el subíndice de carcinogenicidad para realizar la aproximación a la salud. En cuanto al ambiente la aproximación se realizó con organismos metodológicamente estudiados como son las ratas y *Daphnia magna* por lo que pueden tener limitaciones al momento de caracterizar el riesgo para los ecosistemas, se sugiere complementar en un futuro con estudios *in situ*.

10. REFERENCIAS

- Arellano-Aguilar, O., Ortega E.L.E., Montero, M.R. 2014. Daños a la salud por efecto de riesgos ambientales, morbilidad y mortalidad en la población Mexicana. En Albarran, C., Palacios, N.J.M. E., Edilia, M. Salud, ambiente y trabajo. McGraw Hill Education. México.
- Ajalla .P.K.G., Sandoval P.C., Mónica, N y Sancho P. A. M. 2013. Revisión de la relación existente entre la exposición ocupacional al formaldehído y leucemia. Medicina y Seguridad del trabajo. 59(230): 112-123
- Aguilera I, Pedersen M, Garcia-Esteban R, Ballester F, Basterrechea M, Esplugues A, Fernández-Somoano A, Lertxundi A, Tardón A y Sunyer J. 2013. Early-Life Exposure to Outdoor Air Pollution and Respiratory Health, Ear Infections, and Eczema in Infants from the INMA Study. Environ Health Perspect. 121:387–392.

Arias, P. 2002. Hacia el espacio rural-urbano; una revisión de la relación entre el campo y la ciudad en la antropología social mexicana en Estudios Demográficos y Urbanos, mayo-agosto, no.050, El Colegio de México, México. 363-380.

Aristizábal, G.2006.Enfermedad respiratoria aguada como parte de la estrategia AIEPI, importancia y enfoque básico. En Reyes, M.A., Aristizábal, G y F. Leal. Neumología Pediátrica. Infección, alergia y enfermedad respiratoria en el niño. Editorial Médica Panamericana. Bogotá, Colombia.

Bartell, S.M y Biddnger G.R. 1995. Critical Issues in Ecological Risk Assessment. En Hughes, J.H., Biddinger G.R y E. Mones. Environmental Toxicology and Risk Assesment. Atlanta. American Society for Testing and Materials.

Banerjee., G.K., Srivastava K.K., y Chacraborty M.K. 2011. SPM is the Major Pollution in Open Cast Mining - A Case Study. Journal of scientific and industrial research. New Delhi. 60: 416-420

Bejarano F. 1997. La exportación de desechos peligrosos como materiales secundarios para su reuso y recuperación. Los retos. En Garfias, F y Barojas, A. L. W. Residuos peligrosos en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Boffetta, P., Adami, H.O., Cole, P., Trichopoulos, D y Mandel, J.S.2009. Epidemiologic studies of styrene and cancer: a review of the literature. J Occup Environ Med. 51(11):1275-87

CAI.2012. La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica. EUA, Clean Air Institute. Washington D.C.

Campos, I. G. 2003. Saneamiento Ambiental. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica.

Cárdenas, G.B. Revah M. S., Hernández, J. S., Martínez, S.A y Gutiérrez A.V. 2003. Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México, D.F.

Casas, C.M.C. 1999. Meteorología y clima. Ediciones Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.

Casal, F., Montiel J. B y Planas H. C. 1999. Análisis de riesgo en instalaciones industriales. Editions UPC, S.L.

Cassee, F.R., Arts, J.H.E., Groten, J.P y Feron, V.J. 1996. Sensory irritation to mixtures of formaldehyde, acrolein and acetaldehyde in rats. Arch. Toxicol. 70: 329-337.

- Chin, J. Godwin, C., Jia, C., Robins, T., Lewis, T., Parker, E., Max, P y Batterman, S. Díaz- Fierros. T., Díaz-Fierros V. y Peña F.J. 2000. Problemas y perspectivas de la sanidad ambiental. CB. 42(2): 169-176.
- Clark LP, Millet DB, Marshall JD. 2014. National Patterns in Environmental Injustice and Inequality: Outdoor NO₂ Air Pollution in the United States. 9(4).
- Colin, B. Química Ambiental. 2001. Editorial Reverté. Barcelona. España.
- Colombia. 1999. Normatividad ambiental básica. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.
- Common, M y Sigrid, S. 2008. Física para la ciencia y la tecnología, Volumen 1. Editorial Reverté. Barcelona. España.
- Contreras, A.L., Molero M.M. 2011. Ciencia y tecnología del medio ambiente. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid.
- CONAGUA. 2008. Evaluación del Riesgo Sanitario Ambiental de las Zonas Aledañas al Río Atoyac. Comisión Nacional del Agua. Consultado el 20 de Febrero 2015 en: <http://www.cofemermir.gob.mx/mir/uploadtests/17736.66.59.6.Evaluaci%C3%B3n%20de%20Riesgo%20r%C3%ADo%20Atoyac.pdf>
- Costa, R. y Orriols, R. 2005. Síndrome de disfunción reactiva de las vías aéreas. Anales Sistema San Navarra. 28: 65-71.
- Cordella M., A. Tugnoli., F. Barontini., C. Spadoni y V. Cozzani. (2009). Inherent safety of substances: Identification of accidental scenarios due to decomposition products. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 22: 455–462.
- Cuervo, M. M .J. 2010. Población, territorio y desigualdad en la zona Puebla-Tlaxcala. Análisis Económico. 60 (25):55-78.
- Daly, A. y Zannetti, P. 2007. An Introduction to Air Pollution Definitions, Classifications, and History. Chapter 1 of AMBIENT Air POLLUTION (P. Zannetti, D. Al-Ajmi, and S. Al-Rashied, Editors). Published by The Arab School for Science and Technology (ASST) and The EnviroComp Institute.
- Daud, A., Abdin, E., Aziz, A., Niang, L., y Nordin, R. 2010. Assessment of indoor air quality and heat stress exposure in an automotive assembly plant.

Delfino, R. J., Gong, H, Linn, W. S., Hu, Y y Pellizzari, E. D. 2003. Respiratory symptoms and peak expiratory flow in children with asthma in relation to volatile organic compounds in exhaled breath and ambient air. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 13(5):348-63.

Dorward-King, E. J., G. W. Suter., L. A. Kapustka, D. R., Mount, D. K., Reed-Judkins, S., M. Cormier., S. D. Dyer., M. G. Luxon., R. Parrish y G. A. Burton. 2001. Distinguishing among factors that influence ecosystems. En J. Baird y G. A. Burton. *Ecological variability: separating natural from anthropogenic causes of ecosystem impairment*. SETAC Press, Pensacola, Florida, USA. Fairbrother, A., L. A.

García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S y Pérez, A. 2012. Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara (México). *Investigaciones geográficas*. 58: 9-29

Garcés L. F. G. y Hernández M. L. A. 2004. La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*. 1 (2): 67-72

Glass, D.C., Gray, C.N., Jolley, D.J, Gibbons, C., Sim, M.R., Fritsch, L., Adams, G.G., Bisby, J. A y Manuell, R. 2003. Leukemia risk associated with low-level benzene exposure. *Epidemiology*. 14(5):569-77.

GEP. 2013. Actualización del plan de desarrollo de la zona metropolitana Puebla – Tlaxcala. Gobierno del Estado de Puebla.

Glyn, J.G y Heinke G.W. 1999. *Ingeniería ambiental*. Prentice Hall. México

Godish. T. 2000. *Indoor Environmental Quality*. Lewis Publishers. United States of America.

Grau, J. *Contaminación del aire y ruido*. 1981. Análisis y soluciones de la contaminación atmosférica, acústica y radioactiva. Santiago, Ediciones OIKOS Ltda.

Guxens, M., Aguilera, I., Ballester, F., et al. 2012. Prenatal exposure to residential air pollution and infant mental development: modulation by antioxidants and detoxification factors. *Environ Health Perspect*. 120:144–9

Grineski, S., Bolin, B y Boone, C. 2007. Criteria Air Pollution and Marginalized Populations: Environmental Inequity in Metropolitan Phoenix, Arizona. *social science quarterly*, 88 (2): 535-554.

Hernández-Flores J.A., Martínez-Corona B y Méndez-Espinoza, J.A. 2009. Rurales y periurbanos: una aproximación al proceso de conformación de la periferia poblana, Papeles de población. 15 (61), 275-295.

Hill, R.H., Ashley, D.L., Head S.L., Needham, L.L y Pirkle, J.L. (1995).p-Dichlorobenzene exposure among 1,000 adults in the United States. Arch Environ Health. 50(4):277-280.

Karami, K., Rahimi, N y Shehni, M. B.2012. Cyclopalladated complexes of 2-phenylaniline and their catalytic activity in Suzuki and Heck reactions under mild conditions. Tetrahedron Letters. 53 (2012): 2428–2431

Kehrer JP and Biswal SS .2000. The molecular effects of acrolein. Toxicol Sci. 57:6–15

Godish T. (2004). Air Quality.Lewis Publishers. Wasshington, D.C: 144. 113.

Halpern, P., Raskin, Y., Sorkine, P y Oganezov, A. 2004. Exposure to extremely high concentrations of carbon dioxide: A clinical description of a mass casualty incident. Annals of Emergency Medicine. 43(2): 196–199

Ibáñez, G.L.A. 2002. La evolución de las fábricas textiles de Puebla en el corredor Atoyac. Boletín de monumentos históricos. 23: 37-56.

Inche, J. L.2004. Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones. Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM. Lima.

INEGI.2010 Censo de Población y Vivienda 2010 .Consultado en Febrero 2015 de: <http://www.inegi.org.mx/est/scince/scince2010.aspx>

INEGI. México en Cifras. Consultado en Febrero 2015: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>

Jaimes, M. C. P., Retama, H. A. 2013. Diseño de la monitorización de precursores oxidantes fotoquímicos en Ciudad de México y su área metropolitana. Seguridad y Medio Ambiente. 129:54:129.

Jenkis, R. O y Mercado A. G. 2008.Ambiente e Industria en México, regulación y comportamiento empresarial. Colegio de México. México, 1ra edición: 210.

Jenkis. K.T.2015. Nitrogen Compounds. En Harbison R. D; Bourgeois M.M; Johnson G.T. Hamilton and Hardy's Industrial Toxicology. Wiley. Estados Unidos de América: 305.

Jiménez., M. X. A. 2011. Caracterización de la calidad del aire en el sector industrial y propuesta de herramientas de medida. Tesina Fin de Máster. Universidad Politécnica De Catalunya.

Linaker, C. H., Coggon, D., Holgate, S, T., Clough, J., Josephs, L., Chauhan, A. J y Inskip, H. M.2000. Personal exposure to nitrogen dioxide and risk of airflow obstruction in asthmatic children with upper respiratory infection. *Thorax*. 55:930–933

Lloyd, 1987. Special Tests in Aquatic Toxicity for Chemical Mixtures: Interactions and Modification of Response by Variation of Physicochemical Conditions. En V. B. Vouk, G. C., Butler, A. C., Upton, D. V., Parke y S. C. Asher. *Methods for Assessing the Effects of Mixtures of Chemicals*. SCOPE.

López, C.E.1998. Los hidrocarburos aromaticos policiclicos como contaminante Atmosfericos. En *Información Tecnológica*. Centro de Información Tecnológica (CIT).

McCormick, B. T., Edmonds, M., Mather, T. A. Campion, R., Hayer, C. S. L., Thomas, H. E. y Carn, S. A. 2013. Volcano monitoring applications of the Ozone Monitoring Instrument (OMI). En: Pyle, D. M., Mather, T. A. & Biggs, J. *Remote Sensing of Volcanoes and Volcanic Processes: Integrating Observation and Modelling*. Geological Society, London. Introducción a la química Ambiental. Editorial Reverté, UNAM. México: 402-403.

Martínez A.E y Díaz de Mera M.Y.2004. Contaminación Atmosférica. En Martínez A.E y Díaz de Mera M.Y. *Contaminación Atmosférica*. Ediciones de la Universidad de Castilla- La Mancha Cuenca. España.

Merker, G.P., Schwarz, C., Stiesch, G y Frank, O.2004. *Simulating combustion. Simulation of combustion and pollutant formation for engine- development*. Springer

Medinger, S. A., Spagnolo., V.1986. *Handbook of Pulmonary Emergencies*. Pleum publishing corporation. New York.

Miller KA et al. 2007. Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women. *N Engl J Med*. 356: 447–458

Montero, R., Serrano, L., Araujo, A., Dávila, V, Ponce, J., Camacho, R., Morales, E y A. Méndez. 2006. Increased cytogenetic damage in a zone in transition from agricultural to industrial use: comprehensive analysis of the micronucleus test in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 21 (5): 335–342

Morales, E.S. 2010. Casos de daños a la salud por contaminación en los estados de Tlaxcala y Puebla: 231 – 290. En: Pérez A. M. (Coord.). *Cinco miradas sobre el derecho a la salud*. Estudios

de caso en México, El Salvador y Nicaragua, Fundar. Centro de Análisis e Investigación A. C., México.

Morales, R.G. 2006. Contaminación atmosférica urbana, episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Santiago, Chile, Editorial Universitaria.

Mudakavi, J.R. 2010. Principles and Practices of Air Pollution Control and Analysis. I. K. International Publishing House Pvt. Ltd.

Li JJ, Faltings BV. 2011. 'Towards a Qualitative, Region-Based Model for Air Pollution Dispersion', in Proceedings of the IJCAI Workshop on Space, Time and Ambient Intelligence. España.

NASA.2007. About OMI. Consultado en Febrero de 2014 de: <http://aura.gsfc.nasa.gov/scinst/omi.html>

Ocaña, H., Jaimes, E., Coli E.A. y Rico, G. 2001. Contaminación atmosférica. En Méndez, F., López, R y Jaimes, En un enfoque global en Daños a la Salud por Contaminación atmosférica, INE.

OCDE.2013. Estudio Territorial: Puebla-Tlaxcala, México: 168-169. Universidad Autónoma del Estado de México-IMSS, México. 244-261

Organización Panamericana de la Salud. 2005. Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe. Washington, D.C.

Paniagua, M.B. 2008. El sistema periurbano en Tlaxcala. La producción de un espacio emergente. Tesis. UAM-Iztapalapa.

Pérez, R. 2005. Las transformaciones de la estructura agraria ejidal en la zona conurbada de la ciudad de Puebla (1980-2003). En Pérez, Gómez y Ávila. Lo urbano desde lo rural. El caso de la zona conurbada de la ciudad de Puebla (1980-2004), BUAP, Puebla.

Quiroga, M.R. 2007. Propuesta regional de indicadores complementarios al objetivo de desarrollo del Milenio 7: "Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente". Naciones Unidas CEPAL. Santiago de Chile.

Raven, P. H., Evert., R. F. y Eichhorn S. E. 1992. Biología de las plantas. Reverté.

Reyes, M. A y Duque A. G. 2006. Pediatric Neumology: Infección, Alergia y enfermedad respiratoria en el niño. Editorial Médica Panamericana. Colombia.

Rivera, C., Stremme., W y Grutter M. 2013. Nitrogen dioxide DOAS measurements from ground and space: comparison of zenith scattered sunlight ground-based measurements and OMI data in Central México. *Atmósfera*. 26(3), 401-414.

Romano F. 1999. Genotoxicidad de los sedimentos y agua del Sistema Hidrológico Atoyac-Zahuapan en las células meristemáticas de Vicia faba. Tesis de Licenciatura. Biología Agropecuaria. U.A.T. Tlaxcala.

Romeiu I., Kore M. 2003. Contaminación del aire exterior. En Romeiu I., Lopez S. Contaminación ambiental y salud de los niños en América Latina y el Caribe. Cuernavaca Morelos, México.

Sánchez C.J.M. 2011. Características fisicoquímicas de los gases y partículas contaminantes del aire. Su impacto en el asma. *Iatreia*.25 (4): 369-379

Santos, P. H. 2015. Pobreza y marginalidad como criterio de priorización para las enfermedades catastróficas en México. *Revista Cubana Salud Pública*.34 (2).

Salas, Q .H y Velasco, S.P. 2014. Los efectos Sociambientales de la Contaminación del río Atoyac en Nativitas. En Salas, Q .H y Rivemar M.L. (eds.). Nativitas, Tlaxcala. La construcción de un territorio rural. 1: 141-164.

SEMARNAP, INE. 2000. Promoción de la prevención y reducción de riesgos químicos ambientales. Instituto Nacional de Ecología.

SEMARNAT, INECC .2005. Guía de Elaboración y usos de inventarios de emisiones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. Consultado en Octubre de 2014, de: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=457

SEMARNAT, INECC. 2005. Inventario de emisiones de los estados de la frontera norte de México, 1999. México.

SEMARNAT, INECC. 2005. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Western Governors' Association. México, D.F

SEMARNAT. 2006. Programa de gestión en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla-ZMVP. Puebla .México.

SEMARNAT.2012. Programa de Gestión de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado en Septiembre, de 2015, de: http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidaddel Aire/Documents/Calidad%20del%20aire/Proaires/Seguimiento%20y%20evaluaci%C3%B3n%202011/Anexo_1A_Informe_ProAire_Puebla_E11.pdf

Soles, S. A. 2013. Alteraciones en el desarrollo embrionario del pez cebrá por exposición a muestras del Río Atoyac y descargas industriales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

Suter G.W., Efromson R. A., Sample B. E y D. S. Jones. 2000. Ecological Risk Assessment for Contaminated Sites: Lewis Publishers. Washinton DC: 1

Schwilk E, Zhang L, Smith MT, Smith AH, Steinmaus C. 2010. Formaldehyde and leukemia: an updated metaanalysis and evaluation of bias. Journal of Occupational and Environmental Medicine. 52(9): 878-86.

Synder, R. 2002. Benzene and leukemia. Crit. Rev. Toxicol.32:155-210.

Tribunal latinoamericano del agua.2006, Caso: Contaminación industrial en los ríos Atoyac y Xochiac. Estados de Tlaxcala y Puebla. República Mexicana, Veredictos de la Audiencia Pública Regional, México.

Tribunal Latinoamericano del Agua.2006.Veredictos de la Audiencia Pública México, 13-21 de marzo de 2006, México, TRAGUA, en <http://www.tragua.com/tla1.htm>

Catalán-Vázquez, M y Riojas-Rodríguez, H. 2015. Inequidad de género en salud en contextos de riesgos ambientales por actividades mineras e industriales en México. Rev Panam Salud Publica. 37(6):379–87.

Vicencio, M. A.2007. La industria automotriz en México. Antecedentes, situación actual y perspectivas. Contaduría y Administración. 221: 211-248.

Verma, S.S y Desai, B. 2008. Effect of Meteorological Conditions on Air Pollution of Surat City. J. Int. Environmental Application & Science. (5): 358-367.

Weitzenfeld, H. 1996. Manual básico de evaluación de impacto en el ambiente y la salud, de acciones proyectadas. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud (OMS). Metepec. México.

Yoshida, T, Andoh, K y Fukuhara, M. 2002. Urinary 2,5-dichlorophenol as biological index for p-dichlorobenzene exposure in the general population. Arch Environ Contam Toxicol. 43(4):481-5.

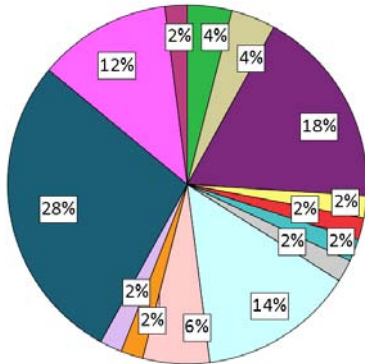
Zamora C. E y Vázquez C.O. 2000. Evaluación del potencial genotóxico de aguas residuales, el caso de la industria textil de Santa Ana Chiautempan, Tlaxcala. Tesis de Licenciatura. Departamento de Agro biología, Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Zhang, L., Freeman, L. E., Nakamura, J., Hecht, S. S., Vandenberg, J. J., Smith, M. T., and Sonawane, B. R. 2010. Formaldehyde and leukemia: epidemiology, potential mechanisms, and implications for risk assessment *Environ. Mol. Mutagen.* 51, 181–191

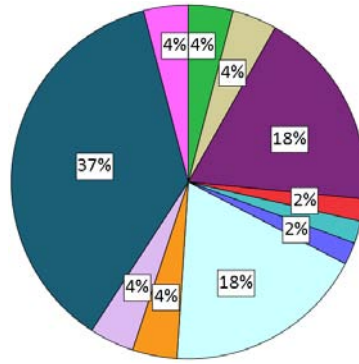
Zuk, M., Tzintzun, G.M y Rojas L.B.2007. Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional

11. ANEXO

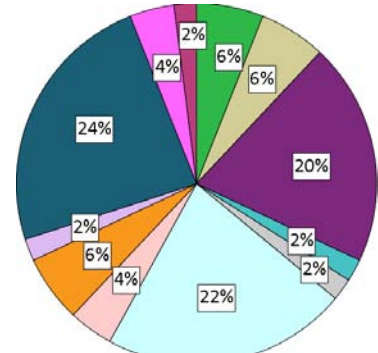
2004



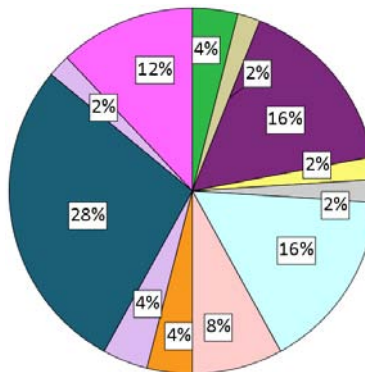
2007



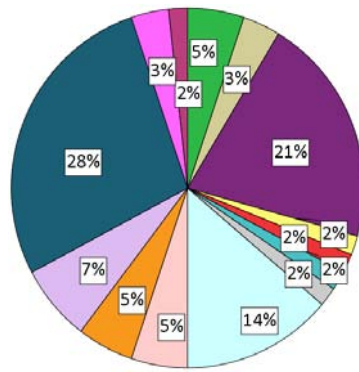
2010



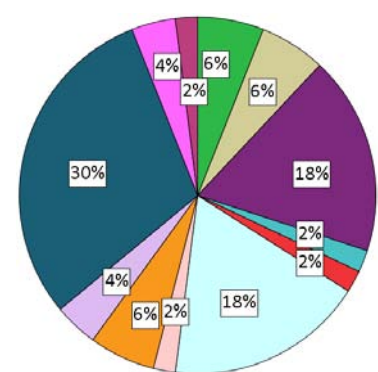
2005



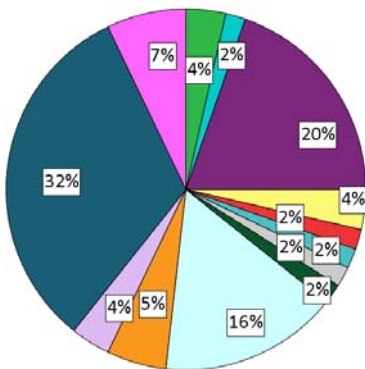
2008



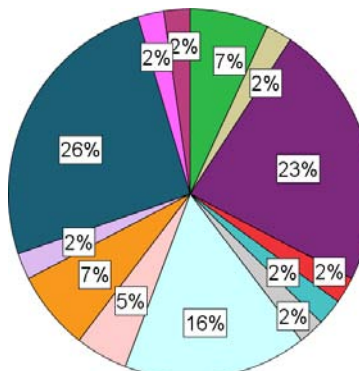
2011



2006



2009



2012

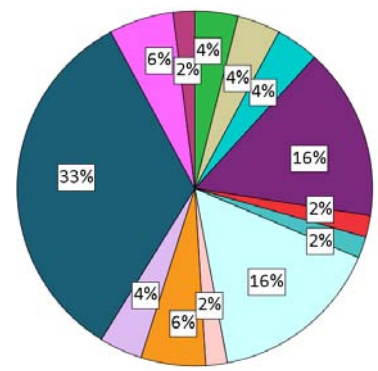


Figura 1. Giros industriales presentes en la cuenca alta río Atoyac en el periodo 2004-2012
(Elaboración del autor con datos del RETC)

Tabla 1. Número de industrias que reportan los compuestos orgánicos volátiles emitidos en la zona de estudio en el periodo 2004-2012.

Municipios	No. de Industrias
Coronango	2
Cuatlancingo	22
Huejotzingo	11
Papalotla de Xicohtécatl	4
Puebla	64
San Martín Texmelucan	7
San Pedro Cholula	7
Nativitas	1

Fuente: Elaboración del autor con datos del RETC.

Tabla 2. Número de reportes de los compuestos orgánicos volátiles emitidos en la zona de estudio en el periodo 2004-20012.

Compuesto	Coronango	Cuatlancingo	Huejotzingo	Papalotla de Xicohténcatl	Puebla	San Martín Texmelucan	San Pedro Cholula	Nativitas	No. De reportes
Acetaldehído		1			7				8
Acroleína	1	1			5				7
Benceno		2			11	2			15
Bióxido de Carbono	7	25	11	4	182	20	16	1	266
Clorodifluorometano		1			1				1
1,2 Diclorobenceno					2	2			4
1,4 Diclorobenceno					4	2			6
Dióxido de Nitrógeno	1	4	10		4				19
Dioxinas			3			2			5
Estireno					1	2			3
Formaldehído		5			13	1			19
Furano			2						2
Hidrofluorocarbono		2							2
Piridina					2				2

Fuente: Elaboración del autor con datos del RETC.

Tabla 3. Concentración promedio de emisiones de compuestos orgánicos volátiles liberados en el período 2004-2012.

Compuesto	\bar{x} (toneladas/año)
Acetaldehído	0.0143
Acroleína	0.0005
Benceno	8.7717
Clorodifluorometano	2,739.2
Dioxinas	1.38×10^{-11}
1,2 Diclorobenceno	5.5003×10^{-06}
1,4-Diclorobenceno	0.0082
Estireno	0.555
Formaldehído	97.7934
Furanos	0,0002

Fuente: Elaboración del autor con datos del RETC.

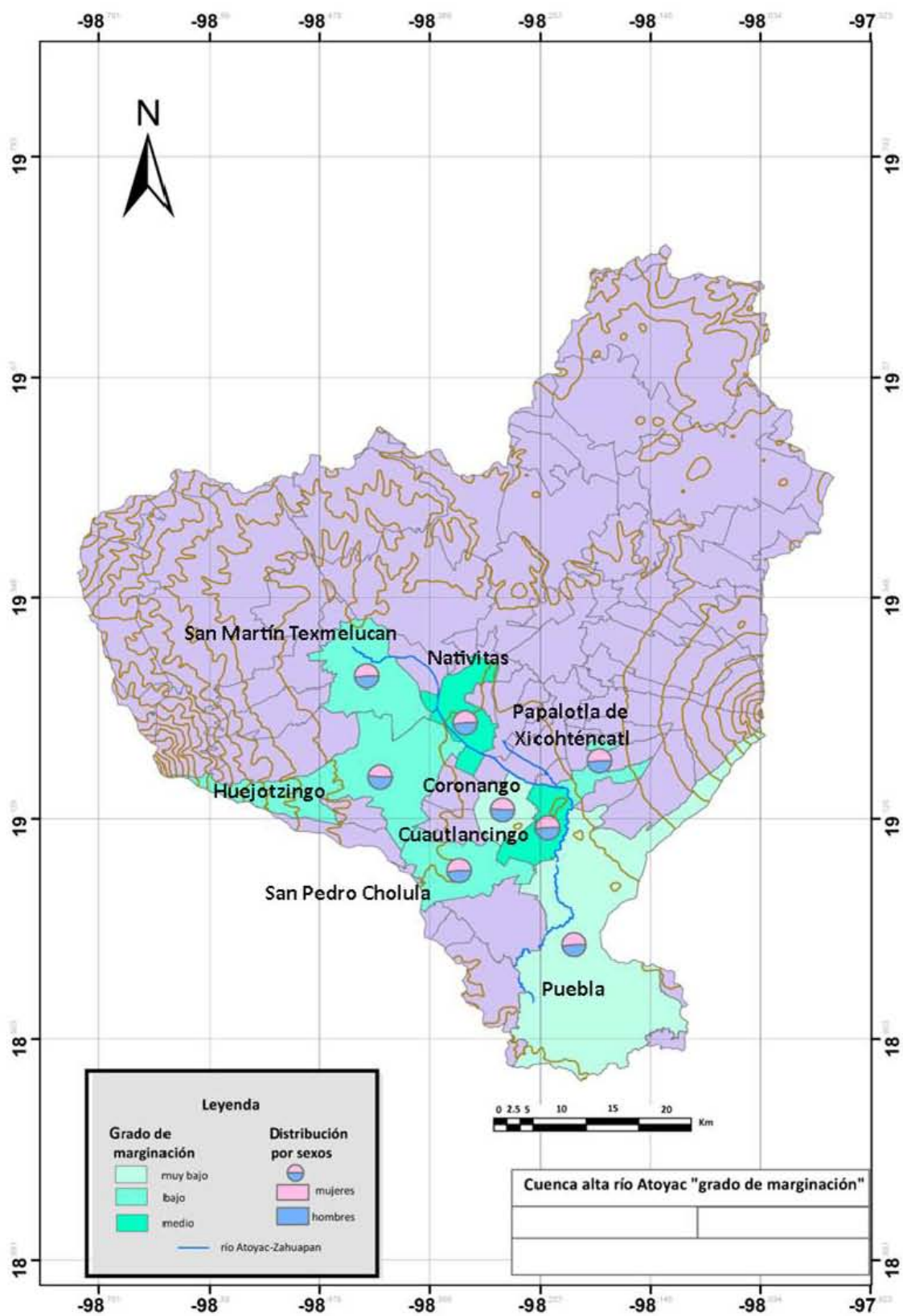


Figura 2. Grado de marginación en la cuenca alta río Atoyac

Tabla 4. Densidad de población por municipio .

Municipio	total de población por municipio	total de población por estado	superficie por municipio (km ²)	densidad por municipio
Coronango	34,596	5,779,829	36.8	940.619
Huejotzingo	63,457	5,779,829	175.36	361.867
Cuatlancingo	79,153	5,779,829	38.17	2,073.696
Puebla	1,539,819	5,779,829	544.65	2,827.171
San Martín Texmelucan	141,112	5,779,829	83.02	1,699.735
San Pedro Cholula	120,459	5,779,829	76.32	1,578.341
Papalotla de Xicohtécatl	26,997	1,169,936	24.46	1,103.720
Nativitas	23,621	1,169,936	56.3	419.555

Fuente: Elaboración del autor con datos de INEGI, 2010

Tabla 5. Total de mujeres y hombres por municipio .

Municipio	Población total de hombres	Población total de mujeres
Coronango	16,758	17,838
Cuatlancingo	38,477	40,676
Huejotzingo	30,723	32,734
Papalotla de Xicohtécatl	12,969	14,028
Puebla	734,352	805,467
San Martín Texmelucan	67,505	73,607
San Pedro Cholula	57,578	62,881
Nativitas	11,330	12,291

Fuente: Elaboración del autor con datos de INEGI, 2010

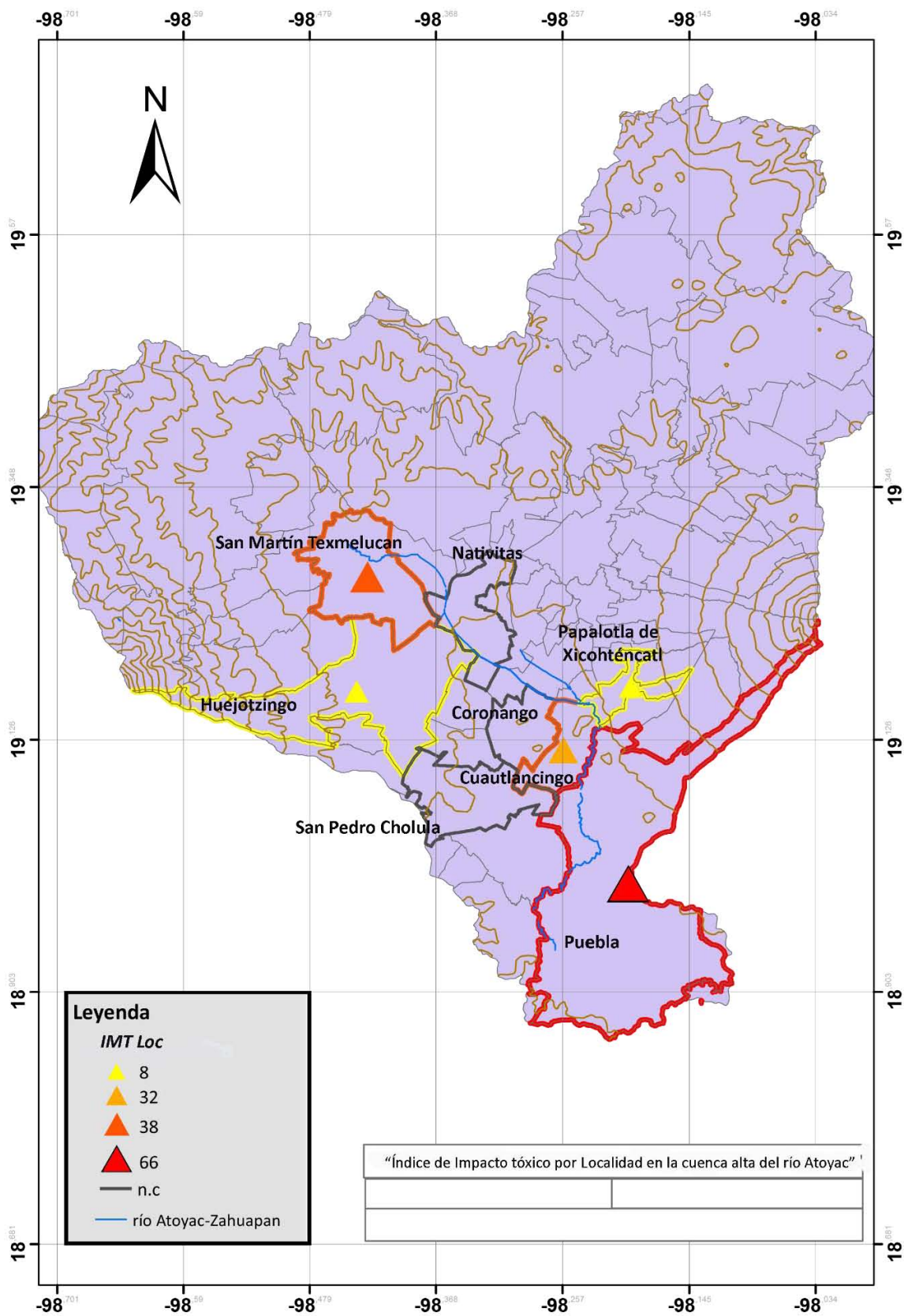


Figura 3. Índice de impacto tóxico por localidad en la cuenca Alta del río Atoyac.

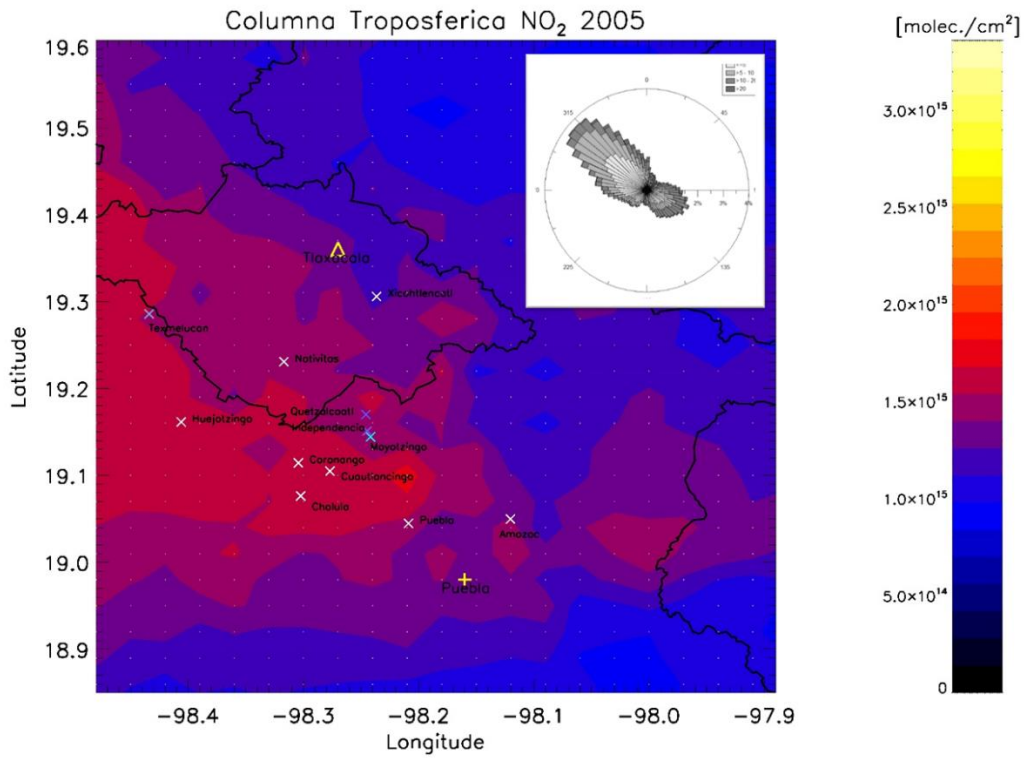


Figura 4. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2005 en la cuenca alta río Atoyac.

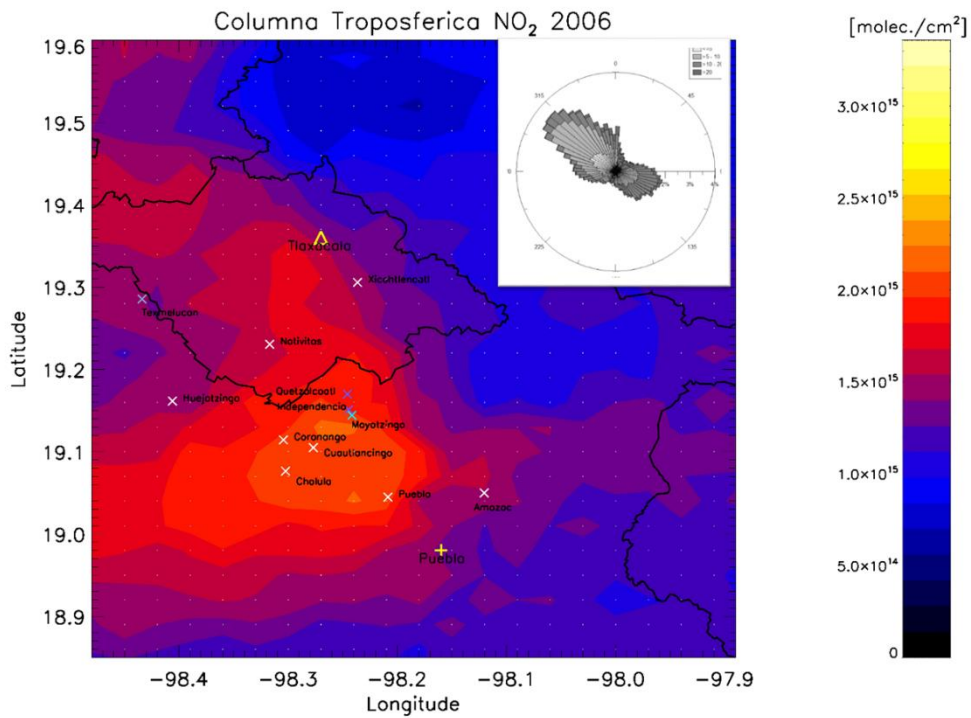


Figura 5. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2006 en la cuenca alta río Atoyac.

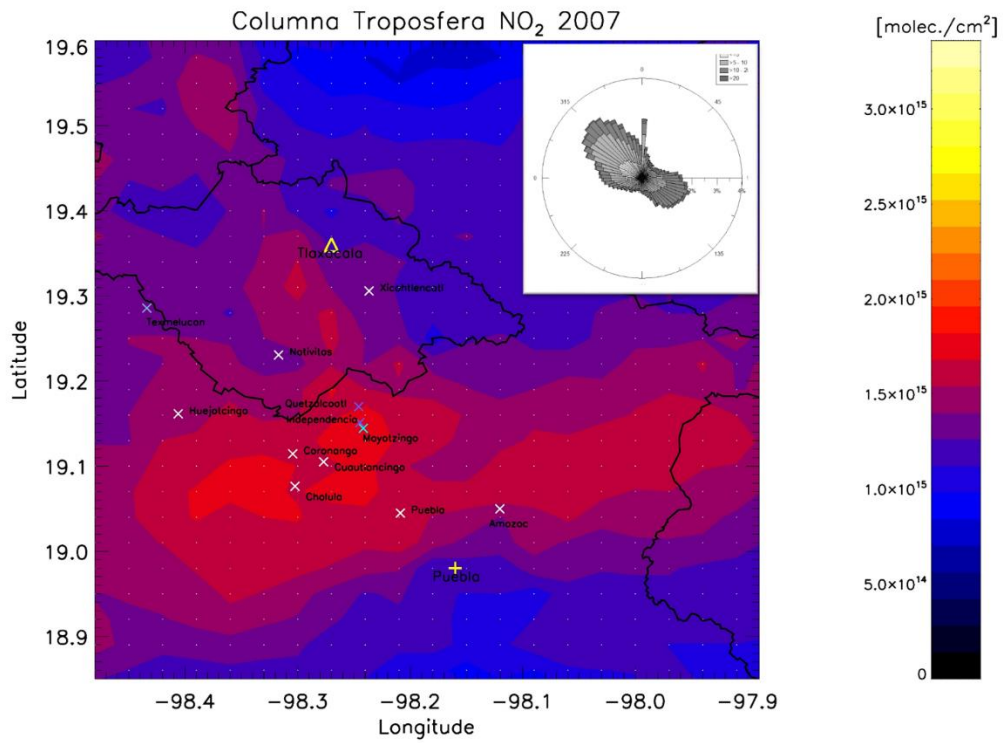


Figura 6. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2007 en la cuenca alta del río Atoyac.

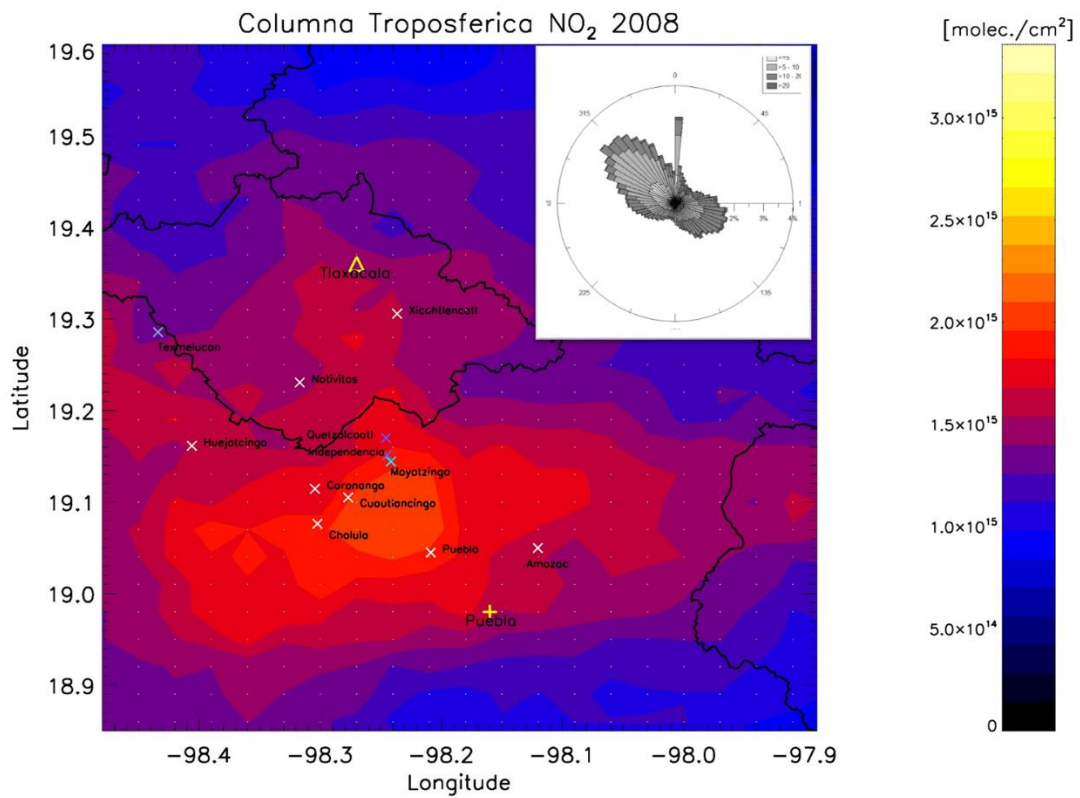


Figura 7. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2008 en la cuenca alta río Atoyac.

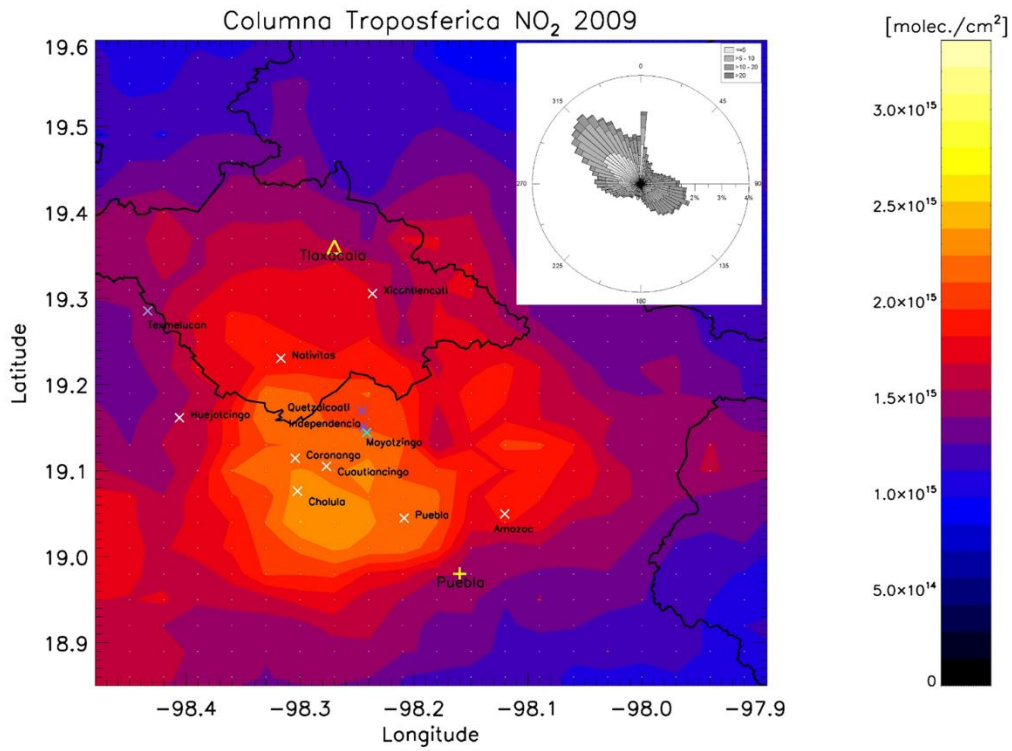


Figura 8. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2009 en la cuenca alta río Attoyac.

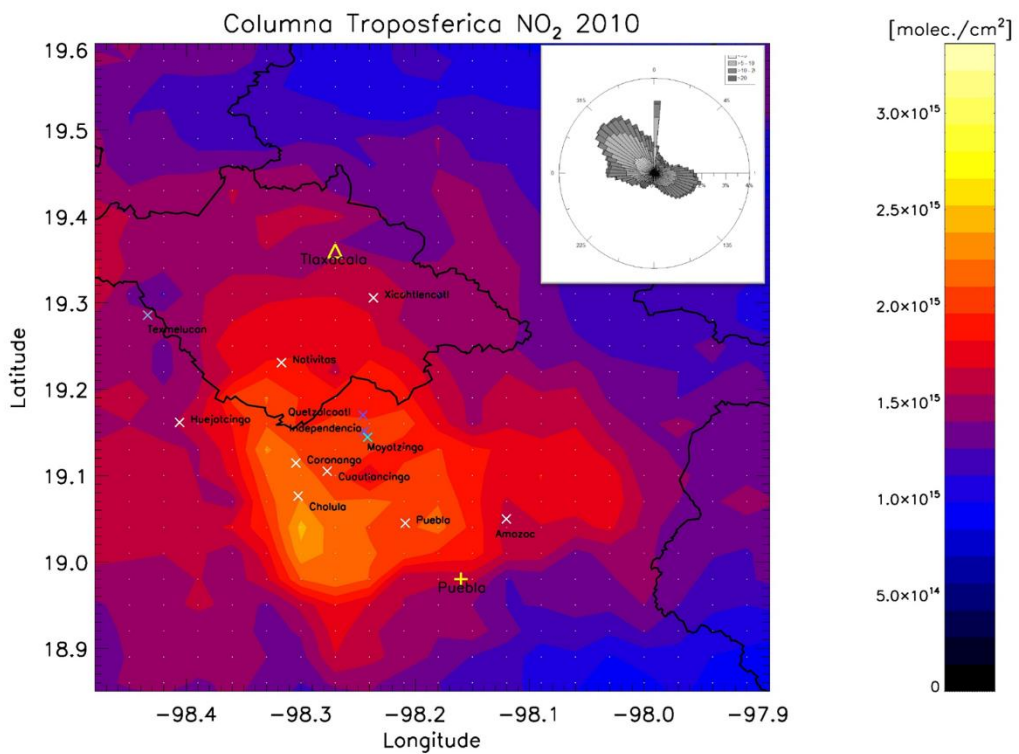


Figura 9. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2010 en la cuenca alta río Attoyac.

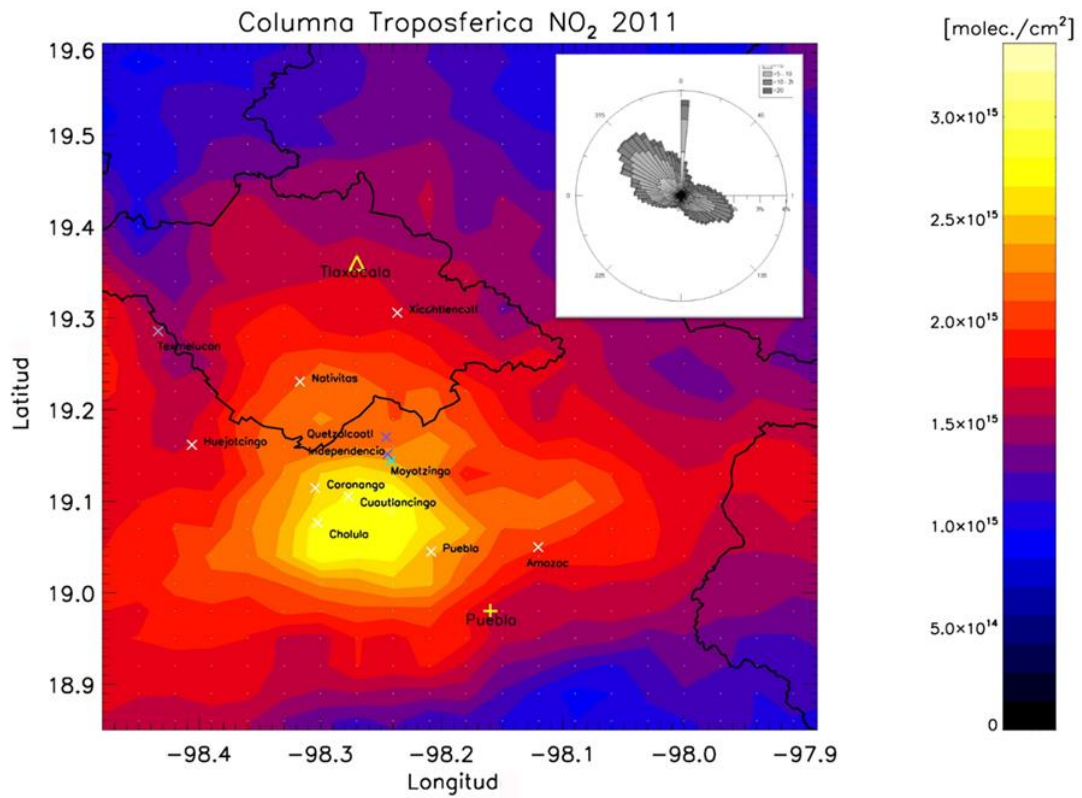


Figura 10. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2011 en la cuenca alta río Atoyac.

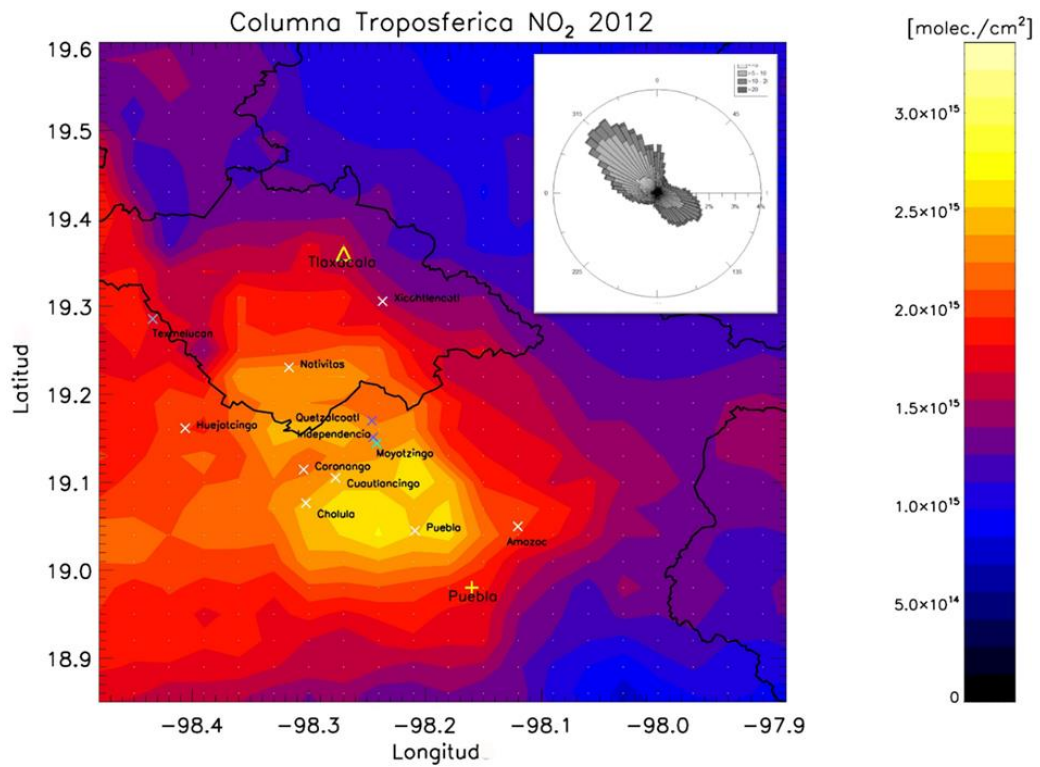


Figura 11. Densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el año 2012 en la cuenca alta río Atoyac.

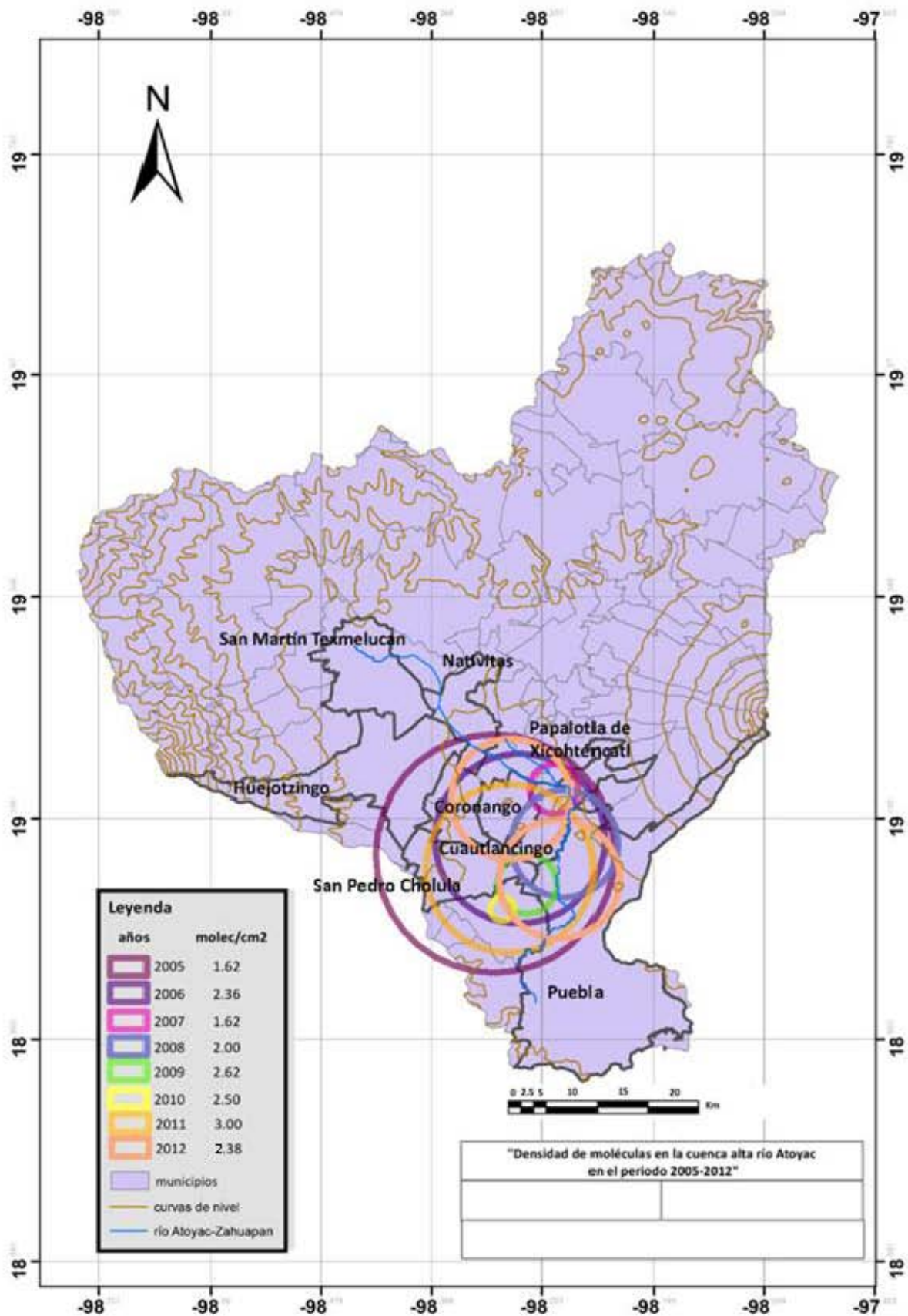


Figura 12. Máxima densidad de moléculas por centímetro cuadrado en el periodo 2005 a 2012 en la cuenca alta río Atoyac.