

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD PÚBLICA
ESCUELA DE SALUD PÚBLICA DE MÉXICO

*EVALUACIÓN DE IMPACTO EN SALUD EN
ESCENARIOS DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN
POR BIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) EN AIRE AMBIENTE EN
MÉXICO: INFORMACIÓN PARA LA TOMA DE
DECISIONES*

P R O Y E C T O T E R M I N A L

Para obtener el grado de:

Especialista en Salud Pública y Medicina Preventiva
2013-2016

P R E S E N T A:

Miguel Ángel Hernández Montes

COMITÉ

DIRECTOR: M. en C. José Luis Texcalac Sangrador

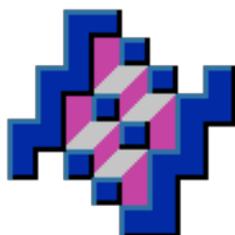
ASESOR: M en SP. Karla Cervantes Martínez

ASESOR: Dra. Leticia Hernández Cadena

LECTOR: Dra. Urinda Álamo Hernández

Dirección de Salud Ambiental
Centro de Investigación en Salud Poblacional (CISP)
Instituto Nacional de Salud Pública

Tlalpan, Distrito Federal, junio 2016



Agradecimientos.

A mis padres Leticia Emilia Montes Cortes y Miguel Ángel Hernández Bolaños que me han brindado siempre todo el apoyo para la consecución de mis metas propuestas tanto profesionales como personales y ser mi ejemplo a seguir.

A mis hermanos Leticia y Rubén que han procurado siempre estar cuando los he necesitado.

A mi Esposa Aduay que supo darme todo su apoyo y amor incondicional siempre, pero sobre todo este tiempo que vivimos lejos. A mi Hija Valentina por darme una gran fuente de inspiración para culminar este proceso en mi vida.

En general a toda mi familia por alentar desde casa y creer siempre en mi y especialmente a mis abuelitas Beca y Emilita.

A todo mi comité por ese gran espíritu de docencia mostrado hacia mi persona, por su gran compromiso y conocimiento compartido y su infinita paciencia.

A todos mis profesores de las especialidad por brindarme de las competencias necesarias que ahora me permiten culminar una etapa profesional más de mi carrera en pro de la salud de las personas.

A la coordinación académica, Dra. Janet y Liz por brindar su apoyo en todo momento.

Al Instituto Nacional de Salud Pública por abrirme sus puertas y brindarme sus herramientas para sentirme orgullosamente un salubrista egresado de tan prestigiado Instituto.

Índice

Introducción.....	5
Antecedentes.....	6
Planteamiento del problema.....	13
Marco teórico.....	16
Caracterización del SO ₂	16
Daños en la Salud.....	16
Evaluación de Impacto en Salud.....	18
Justificación.....	20
Objetivos.....	21
Materiales y Métodos.....	22
Delimitación del área de estudio.....	22
Estimación de la exposición a SO ₂	27
Enfoque crónico.....	27
Enfoque agudo.....	28
Selección del escenario de exposición.....	28
Escenarios para enfoque crónico.....	29
Escenario para enfoque agudo.....	29
Selección de la Función Concentración Respuesta (FCR).....	29
Frecuencia de los eventos en salud de interés.....	32
Enfoque crónico.....	32
Enfoque Agudo.....	32

Estimación de los impactos en salud	32
Resultados.	34
Delimitación del área de estudio	34
Estimación de la exposición a SO ₂	34
Selección de la Función Concentración Respuesta	40
Frecuencia de los eventos en salud	41
Estimación de los impactos en salud.	41
Enfoque crónico.....	41
Enfoque Agudo.	43
Discusión.....	44
Recomendaciones.....	47
Consideraciones éticas.	48
Bibliografía	49

Introducción.

La contaminación ambiental es un grave problema de salud pública ya que representa un riesgo para la salud de las poblaciones, al carecer en muchos países, incluido México, de una reglamentación actualizada que proteja a las poblaciones más vulnerables de los efectos en la salud causados por la contaminación ambiental.

La exposición a la contaminación del aire ambiente ha sido relacionada con varios efectos adversos a la salud, desde síntomas subclínicos, cambios en la función pulmonar, cáncer pulmonar, aumento de las admisiones hospitalarias, los servicios de urgencias y eventos relacionados con la muerte prematura por causas cardiovasculares y respiratorias entre otras.(1)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que en el 2012, aproximadamente 7 millones de personas murieron a causa de la contaminación atmosférica, tanto extramuros como intramuros lo cual implica que, una de cada 8 muertes en el mundo pueden atribuirse a la exposición de la mala calidad del aire.(2) Las mismas estimaciones calcularon que de los 7 millones, aproximadamente 3.7 se deben a la contaminación del aire exterior. (3)

Las tasas de mortalidad y demás indicadores se observan continuamente en países de bajos ingresos, (4) relación estrecha que se guarda con los Determinantes Sociales de la Salud. (5)

Los contaminantes criterio son aquellos que están normados y a los cuales se les ha establecido un límite máximo para protección de la salud de la población, entre ellos se encuentra el bióxido de azufre (SO_2), material particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), y plomo (Pb).

El bióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro que se produce por la quema de combustibles fósiles, relacionado principalmente con la combustión en los vehículos motorizados. Causando principalmente efectos adversos en la morbilidad y mortalidad cardiovascular y respiratoria.

Los estudios epidemiológicos y toxicológicos permiten evaluar los efectos en salud que provoca la contaminación del aire en el ser humano, constituyendo una parte fundamental en la Evaluación de Impacto en Salud (EIS), misma que con el paso del tiempo y perfeccionamiento de la metodología ha permitido a los tomadores de decisiones en salud ambiental, medir el efecto de las intervenciones en gestión de la calidad del aire que se proponen preservar la salud de las poblaciones. (6)

La mayoría de las EIS en el mundo se han realizado principalmente para ozono y material particulado, tanto en sus efectos como en los beneficios obtenidos por la disminución de las concentraciones en el aire ambiente. En lo que respecta al SO₂ después de una revisión de la literatura, hasta nuestro conocimiento existen pocas evaluaciones de impacto sobre este contaminante, incluso en México no se identificó ningún estudio que evalué el impacto en la salud que tiene la exposición al SO₂.

En México los límites máximos permisibles no son concordantes con lo que dictan las recomendaciones y/o normatividad internacional, es decir hay un desfase en términos de magnitud y temporalidad. De tal forma que el presente trabajo, ha permitido cuantificar los principales impactos a la salud causados por la contaminación del aire ambiente por bióxido de azufre a partir de la realización de una Evaluación de Impacto en Salud, con la finalidad de aportar sustento en la toma de decisiones, como en la actualización de los valores permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010. "Salud ambiental, criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO₂)" .

Antecedentes.

El aire es un requerimiento de todo ser humano, el cual se compone de aire seco que está integrado en diferentes porcentajes y permanentemente por los siguientes elementos: nitrógeno, oxígeno y otros gases inertes. (7)

A los contaminantes del aire se les ha clasificado como contaminantes primarios y secundarios, de acuerdo a la fuente de emisión. Los primeros son aquellos que

han sido emitidos directamente a la atmósfera por fuentes de emisión, dentro de los cuales podemos clasificar a los óxidos de azufre, hidrocarburos, material particulado, plomo, monóxido de carbono, y óxidos de nitrógeno. Los contaminantes secundarios, por su lado resultan de las reacciones entre los componentes naturales de la atmósfera o por la reacción entre dos o más contaminantes primarios como sucede con el ozono.

Con lo cual a partir de ellos, en diversos países incluido México, se han generado normatividades para establecer los límites máximos permisibles para dichos contaminantes.

El SO_2 es un contaminante criterio, es un gas que pertenece al grupo de los óxidos de azufre, es un gas incoloro, que resulta de la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón y el petróleo. Es entonces la actividad industrial y la quema de combustibles en los vehículos motorizados una fuente antropogénica del SO_2 y las actividades volcánicas la única fuente natural de este contaminante. (8)

El SO_2 es un agente extraño que ingresa al cuerpo humano por inhalación (vía de exposición), al llegar a las vías respiratorias actúa como irritante de las mucosas del tracto respiratorio alto y bajo, esta condición de agente extraño e irritante produce una inflamación que desencadena la cascada de la inflamación y posterior liberación de sustancias proinflamatorias; cuestión por la cual las personas asmáticas son más susceptibles al daño ante la exposición al SO_2 . De la misma manera el estrés oxidativo generado de la exposición al SO_2 produce una irritación local de las vías respiratorias (9) con el mismo daño a nivel tisular.

Con antecedente en los efectos a la salud ocasionados por diversos eventos de contaminación del aire, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), desde 1970 determinó que como medida de protección a la salud se debían establecer límites máximos de concentración para diferentes contaminantes, denominándolos contaminantes criterio; estos son: material

particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), bióxido de azufre (SO_2) y plomo. (10,11)

Los límites permisibles de SO_2 entre México, Estados Unidos y la Unión Europea, establecen diferentes ventanas de tiempo para evaluar la concentración del SO_2 , pero lo que más destaca es que México tiene límites inferiores en comparación con las recomendaciones internacionales de la OMS.

En lo que respecta a legislación, en México se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización el 1º de Julio de 1992, ley que pretendía uniformar los criterios de medición y normalización. Conforme a esta Ley se estableció en 1993 la Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO_2). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población". Esta norma fija los límites máximos permisibles estableciendo que la concentración no debe sobrepasar los $341 \mu g/m^3$ en 24 horas y $79 \mu g/m^3$ para una media aritmética anual. Cabe mencionar que esta norma no establece si son registros máximos o promedios para cada caso.

No es sino hasta el año 2006 que se presenta la propuesta Proyecto de Norma para sustituir a la norma de 1993. En dicho proyecto se proponía tener mediciones más estrictas conforme a las recomendaciones internacionales e incluir mediciones para exposiciones a corto plazo.

La norma vigente (Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010. "Salud ambiental, criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre") fue publicada en el Diario Oficial de la Federación en Septiembre del 2010 con las siguientes especificaciones(12):

- "La concentración de SO_2 como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de $288 \mu g/m^3$ o 0.110 ppm promedio en 24 horas, una vez al año, para protección a la salud de la población".

- “La concentración de SO₂ como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 66 µg/m³ o 0.025 ppm promedio anual, para protección a la salud de la población”.
- “La concentración del promedio de ocho horas de SO₂, como contaminante atmosférico, debe ser menor o igual a 524 µg/m³, o 0.200 ppm promedio horario para no ser rebasado dos veces al año”.

La problemática del SO₂ es importante para todo el país ya que la contaminación por este gas a nivel nacional es generada en su mayoría por la combustión de los vehículos automotores habiendo ciudades que por características de la actividad industrial específicamente aquellas que cuentan con refinerías y extensos parques vehiculares presentan mayores problemas de contaminación del aire por SO₂. En el año 2009, a partir del Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas se mostró que de las ciudades más contaminadas por SO₂ (de acuerdo a los indicadores utilizados para el cumplimiento de la Norma) fueron Salamanca, Irapuato y León, en el estado de Guanajuato (13).

La Tabla 1 muestra el total de emisiones emitidas a la atmósfera en el año 2008 según el Inventario Nacional de emisiones 2008, observándose que las Fuentes Fijas es decir, la industria, emite la mayor cantidad en toneladas de SO₂.

Tabla 1. Emisiones de SO₂ en el año 2008.

Emisiones de SO₂ por fuente (Toneladas al año) 2008	
Área	23,428.67
Fijas	2,171,659.47
Móviles	46,123.48
Naturales	0
Total	2,241,211.62

Fuente: <http://sinea.semarnat.gob.mx/sinae.php?steprep=5&process=UkVQT1JURUFET1I=&r=MS4gVG90YWwgTmFjaW9uYWwgMjAwOC4=>

El inventario de emisiones del año 2008 realizó una recopilación (Tabla 2) de los estados que tienen mayor número de emisiones en toneladas por fuentes fijas, destacando el Estado de Hidalgo y Guanajuato conocidos por refinerías, sin

embargo, grandes zonas industriales como las que se encuentran en el Estado de México, Monterrey y el Distrito Federal no figuran dentro de las entidades principales como emisoras de contaminantes.

Tabla 2. Principales entidades emisoras de SO₂ por fuentes fijas 2008.

Fuentes fijas por estado, 2008.	
(Toneladas al año)	
Campeche	574,972.54
Hidalgo	216,610.55
Coahuila	190,970.08
Colima	166,475.78
Veracruz	160,834.82
Oaxaca	111,004.62
Sinaloa	106,276.81
Guerrero	104,172.25
San Luis Potosí	86,201.78
Sonora	75,004.07
Chiapas	54,592.02
Tamaulipas	50,157.57
Guanajuato	48,461.91
Total en el País	2,171,659.47

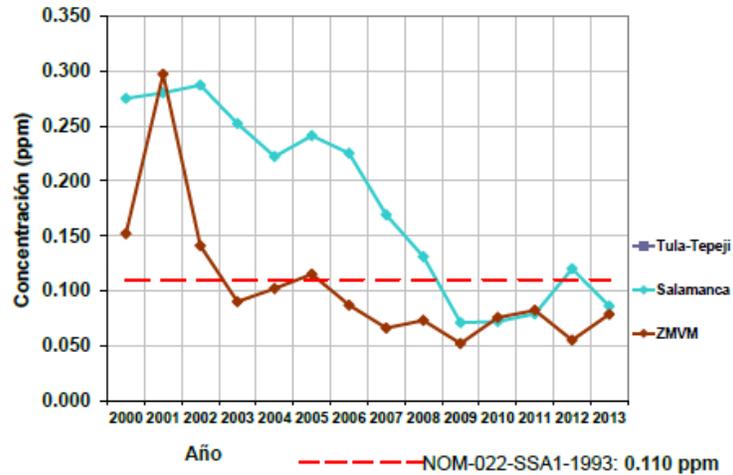
Fuente: <http://sinea.semarnat.gob.mx/sinae.php?steprep=5&process=UkVQT1JU RUFET1I=&r=MS4gVG90YWwgTmFjaW9uYWwgMjAwOC4=>

En el 2014 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) publicó el Informe Nacional de Calidad del Aire (14), con información recopilada hasta el año 2013, la información para SO₂ solo se muestra para las ciudades de Salamanca, Tula-Tepeji y la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), debido a los criterios de calidad y suficiencia de datos de las redes de monitoreo.

Tanto en la Ilustración 1 como la Ilustración 2 puede observarse el comportamiento del SO₂ en las ciudades de Salamanca y la ZMVM desde el año 2000 hasta el 2013 para los límites de 24 horas y anual. La ciudad de Tula sólo cuenta con información del año 2013. La ZMVM ha cumplido con lo establecido en la normatividad vigente en los últimos años, situación que no es similar en la ciudad de Salamanca, probablemente debido a la actividad industrial de la zona y a que en la ZMVM existen restricciones al uso vehicular. A pesar de que estas

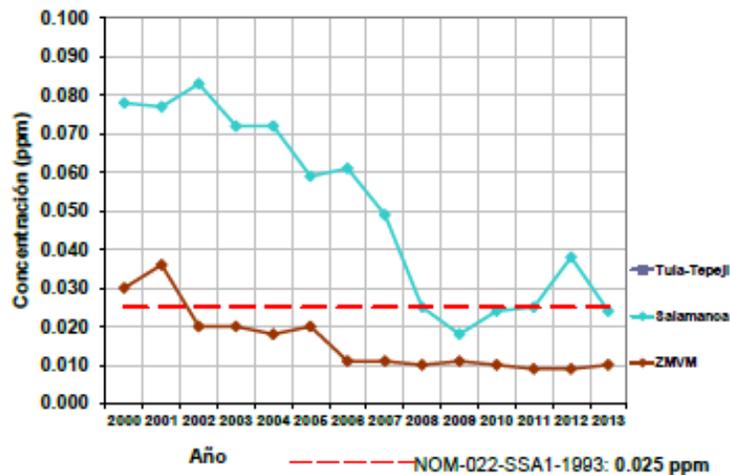
ciudades cumplen con la normatividad Mexicana no es concordante para las recomendaciones internacionales pues los límites establecidos son más estrictos, lo cual puede sugerir que la población está expuesta a niveles dañinos para su salud.

Ilustración 1. Comportamiento de las concentraciones de SO₂ en ciudades mexicanas, límite de 24 horas.



Fuente: Informe Nacional de Calidad del Aire 2013. (14)

Ilustración 2. Comportamiento de las concentraciones de SO₂ en ciudades mexicanas, límite anual.



Fuente: Informe Nacional de Calidad del Aire 2013. (14)

En cuanto a la evaluación del cumplimiento de la norma en los dos informes se observa un avance progresivo con una tendencia a la baja en la ciudad de

Salamanca y en la ZMVM (únicas que despliegan información en los dos informes). Este cumplimiento puede deberse a que desde el año 1993 (NOM-086-ECOL-1993) se redujo el azufre en el diesel usado en la combustión de los vehículos y para el 2006 en las gasolinas Premium y Magna (NOM-042-SEMARNAT-2005); esto para las fuentes móviles que incluyen a los autos circulantes.

Planteamiento del problema.

Las Guías de calidad del aire de la OMS buscan ofrecer orientación sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación del aire en la salud, con la finalidad de proteger la salud pública estableciendo límites a la emisión de los contaminantes. Las guías de calidad del aire pretenden de igual manera ser una base para los actores clave en la formulación de políticas públicas en la gestión de la calidad del aire. (15)

La contaminación ambiental es un grave problema de salud ambiental y por supuesto de salud pública, tanto por su magnitud como por su frecuencia. De esta manera las autoridades a fin de proteger la salud de la población han tenido que tomar decisiones para prevenir y controlar la contaminación atmosférica, ejemplo de esto es la Guía de calidad de aire del 2005 de la OMS y en México las NOMS para calidad del aire.

Ante los diversos efectos a la salud que se presentan por la exposición a la mala calidad de aire, la protección de las poblaciones se vuelve imperativa para generar ambientes saludables que permitan el bienestar de los individuos.

En México hay un desfase importante respecto a lo que establecen los lineamientos internacionales, La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010 "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO₂)" tuvo su última actualización en el año 2010, sin embargo los valores se encuentran muy por arriba de lo recomendado para la protección de la población. (12)

En lo que respecta al bióxido de azufre el valor permitido está 10 veces por arriba de los valores guía que recomienda la OMS, (para su único valor comparable, el promedio de 24 horas); las concentraciones en la norma mexicana están dadas para promedios anuales, de 24 horas y 8 horas, situación que no corresponde hoy en día con las recomendaciones de las Guías de calidad del aire de la OMS, donde se establecen solo mediciones para promedios de 24 horas y el promedio

de 10 minutos, ya que la evidencia ha mostrados que los principales efectos a la salud son dados por exposiciones agudas. Así se muestra de nuevo que con estos parámetros la normatividad en México solo se puede comparar con valores establecidos para promedios de 24 horas (Tabla 3).

Tabla 3. Límites máximos permisibles para SO₂ y su comparación con las recomendaciones y normatividad internacional.

	Concentración de SO ₂			
	µg/m ³ (ppm)			
	NOM-022-SSA1-2010	OMS	EPA	UE
Promedio anual	66 (0.025)			
Promedio de 24 hrs	288 (0.11)	20 (0.008)		125 (0.047)
Promedio de 8 hrs	524 (0.20)			
Promedio de 10 min		500 (0.19)		
Promedio 1 hora			196.5(0.075)	351(0.13)

Fuente:
 NOM-022-SSA1-2010
 OMS http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
 UE. <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
 EPA <http://www.epa.gov/air/criteria.html>

Este desfase en los límites implica que, aun cuando se conoce que personas susceptibles pueden sufrir daños a la salud ante exposiciones a altas concentraciones, durante periodos inclusive muy cortos de tiempo (10 minutos) (9), en México se propicia que aumenten los índices de morbi/mortalidad atribuible a la contaminación ambiental y años de vida saludables perdidos prematuramente. Por lo tanto podrían verse reflejados beneficios a la salud de los mexicanos, si se optara por límites más estrictos con las implicaciones que esto representa para disminuir las concentraciones de SO₂.

Por lo tanto en lo que se refiere a legislación en México el artículo 51 de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización las normas oficiales mexicanas deben revisarse y/o actualizarse cada 5 años después de que entraron en vigor, (16) lo que significa que la NOM-022-SSA1-2010 debió someterse a un proceso de revisión desde el año 2015, situación que no ha ocurrido, entre otras cuestiones, porque no existe suficiente evidencia en México que sea útil para la toma de decisiones.

Hasta hoy en México no se contaba con la evidencia del impacto que tienen los límites actuales en la salud de la población, por lo que este estudio puede brindar a las autoridades correspondientes bases científicas para la toma de decisiones y consiguiente protección de los ciudadanos.

Entonces a través de esta evaluación se pretende responder:

¿Qué impactos a la salud propician valores límite permisibles de SO₂ en aire no concordantes con los valores guía de calidad del aire de la OMS en México?

¿Cuál es la magnitud de los impactos a la salud en términos de muertes evitables, bajo el planteamiento de escenarios de reducción de la contaminación por SO₂ en México?

Marco teórico.

Caracterización del SO₂

El bióxido de azufre es un gas que se encuentra en forma natural en el carbón y en el petróleo. Tiene como principales fuentes de emisión la combustión de compuestos que contienen azufre, como ya se mencionó el carbón, utilizado en la generación de energía y procesos industriales, así como la combustión de gasolinas y diésels con altos contenidos de azufre (ejemplo: combustibles usados en países en vías de desarrollo). Regularmente los gases tiene unidades de medición en partes por millón o su conversión en microgramos de contaminante por metro cúbico.

El SO₂ regularmente se presenta en conjunto con el material particulado, por estar presente dentro una mezcla compleja, el SO₂ es muy soluble en agua por lo que es rápidamente absorbido en las vías respiratorias altas. A pesar de que se le ha dado menor importancia a este contaminante, la evidencia actual le relaciona con el aumento de la mortalidad cardiovascular y respiratoria ante exposiciones agudas. (11)

Respecto a los impactos en la salud, los diversos estudios epidemiológicos han evidenciado que existe una relación entre la exposición al SO₂ y la mortalidad a corto plazo, empero la evidencia actual sugiere una relación más robusta en la morbilidad a corto plazo en las admisiones a hospitales por complicaciones respiratorias y cardiovasculares. (17)

Daños en la Salud

El estudio de los daños a la salud que provoca la contaminación ambiental ha permitido encontrar diversas situaciones que ponen en riesgo la salud de la población. El bióxido de azufre es un gas que inicialmente ocasiona irritación en la mucosa del tracto respiratorio, por consiguiente los principales daños a la salud se ven relacionados con entidades nosológicas de tipo respiratorio y más aún en personas susceptibles al daño como son personas con procesos asmáticos y

complicaciones cardiovasculares. Los problemas en la morbilidad se observan en mayores aumentos en las salas de urgencias debido a las exacerbaciones del asma, síndromes coronarios y admisiones hospitalarias por problemas respiratorios, lo que concuerda con estudios sobre la mortalidad relacionada al dióxido de azufre principalmente cardio-respiratoria. (Tabla 4)

Tabla 4. Resumen de los estudios epidemiológicos que han evaluado los efectos en salud.

Estudio	Temporalidad/Diseño	Efectos	Población	Unidad de cambio	Resultado IC 95%
Bravo et al. 2015(18)	Largo plazo Case crossover	Mortalidad cardiovascular respiratoria	>65 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 1.51% (0.51- 2.51)
Tong et al. 2014(19)	Corto plazo Serie de tiempo	Morbilidad cardiovascular	>65 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 0.43% (0.03-0.84)
Yang et al. 2014 (20)	Corto plazo Serie de tiempo	Mortalidad por accidente cerebrovascular	>65 años	26.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 2.96% (0.70-5.27)
Goldberg et al. 2013 (21)	Corto plazo	Mortalidad diaria	>65 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 4.59%, (-0.53, 9.97)
Qian et al. 2013 (22)	Largo plazo Case crossover	Mortalidad por accidente cerebrovascular	>65 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 0.43% (0.07 0.79)
Amancio 2012 (23)	Corto plazo Serie de tiempo	Mortalidad cardiovascular	>50 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 1.4% (1.01-1.06)
Chi et al. 2012 (24)	Corto plazo Serie de tiempo	Admisiones hospitalarias respiratorias	menores de 5 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 5.85% (0.44-11.55)
Huang et al 2012 (25)	Corto plazo Serie de tiempo	Mortalidad general	>65 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PCR 1.09% (0.91 - 1.27)
Guo 2010 (26)	Corto plazo Case crossover	Admisión a urgencias	25-64 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OR 1.037 (1.004-1.071)
Domínguez-Rodríguez 2013 (27)	Corto plazo Serie de tiempo	Hospitalización por síndrome coronario agudo	>65 años	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OR 1.43 (1.039-1.931)

Notas: PCR: porcentaje de cambio en el riesgo. OR: odds ratio

Evaluación de Impacto en Salud

La Evaluación de Impacto en Salud, es una metodología que utiliza resultados de la evidencia epidemiológica para evaluar, por ejemplo, el impacto de la implementación de medidas que protejan a la población, ya sea de manera anticipatoria o proyectos en fase de planeación (28) y así estimar los beneficios por dichas medidas.

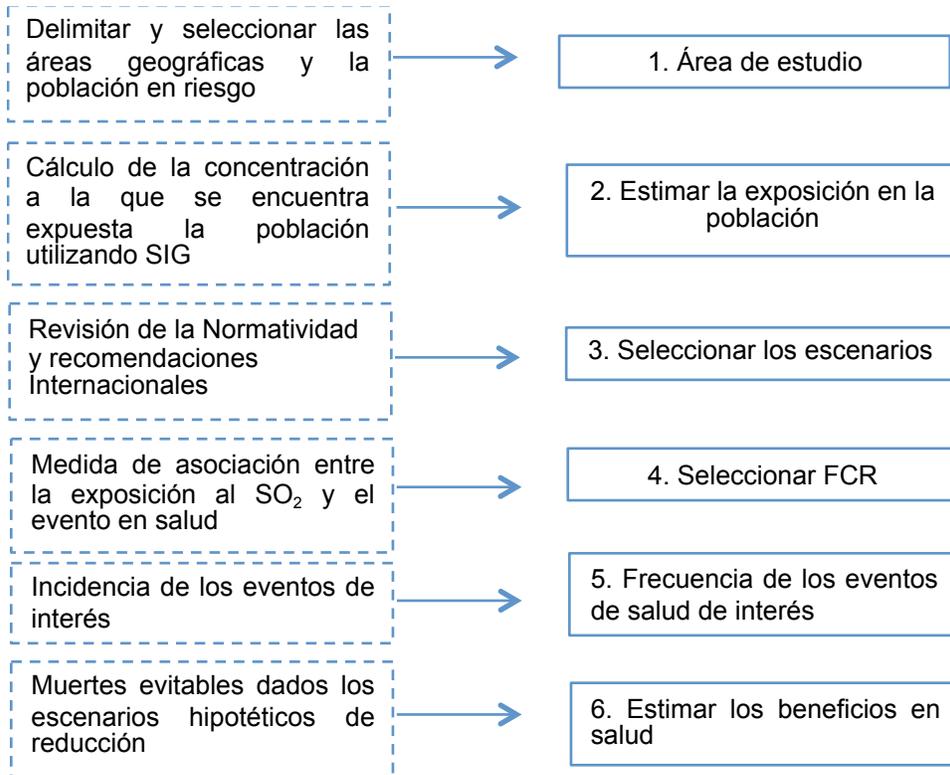
La EIS es un proceso metodológico que la OMS sugiere como herramienta para la toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes, y la define como “una serie de procesos, métodos y herramientas para evaluar una política, programa, proyecto que tengan como finalidad reducir la contaminación ambiental por la implementación de medidas de control de la misma”, es decir cuánto de la carga de la enfermedad puede reducirse con la implementación. (29–34)

Ante la implementación de medidas de control de las emisiones para la protección de la población, la EIS trata de determinar la cantidad de carga de la enfermedad que puede reducirse ante la aplicación de estas medidas y expresan sus resultados en términos de probabilidad a través del número de casos que pueden evitarse de los diferentes efectos a salud.

En la EIS a lo largo de su reciente historia, se reconocen tres campos disciplinarios que dan base a las EIS: Salud ambiental, la visión social del proceso de salud y la equidad en salud. La salud ambiental reconoce los impactos que pueden tener en la salud de la población, los efectos adversos, particularmente en términos de mortalidad, por ejemplo los grandes desastres ambientales, teniendo como disciplinas la epidemiología y la toxicología. La visión social hace alusión al origen mismo de la definición de Salud propuesta por la OMS, al reconocer que la salud es un proceso histórico, social y cultural y no solo la ausencia de enfermedad. La equidad en salud hace referencia a las diferencias prevenibles y evitables en salud que históricamente han existido. (35)

Los pasos de la EIS pueden esquematizarse en la Ilustración 3: (6,29)

Ilustración 3. Pasos de la Evaluación de Impactos en Salud.



Fuente: elaboración propia, INE. Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica. Instituto Nacional de Ecología; 2009. 82 p

La revisión de la literatura permitió identificar que solo se ha realizado una EIS para SO₂, en Irán en el 2011. Las EIS se han realizado principalmente para evaluar partículas y ozono. Sobre el bióxido de azufre solo se identificó una EIS la cual fue publicada en el año 2012, realizada en la ciudad de Teherán una de las más pobladas de Irán. Dicha evaluación evaluó los daños a la salud, utilizando el promedio de 24 horas, es decir un evento agudo, se encontró que para la mortalidad general se evitarían 1,458 muertes en promedio que van desde 1,102 hasta 1,739 muertes, para el año evaluado que fue el 2011. (33)

Justificación.

Los estudios sobre exposición y evaluaciones de impacto sobre SO₂ son aún insuficientes en el país lo que abre una importante ventana de oportunidad para realizar una Evaluación de Impacto en Salud en México, aún más cuando existen ciudades del país en donde la exposición a este contaminante es un problema como lo son las ciudades de Salamanca, Irapuato, León y la Zona Metropolitana del Valle de México, esto acorde al Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas del año 2009. (13)

El retraso en la actualización de la Norma Oficial Mexicana respecto a las concentraciones vigentes requiere que se realice una revisión de los actuales estudios epidemiológicos que demuestren los efectos en salud que tiene la exposición al SO₂. El desfase en las concentraciones de la normatividad vigente propicia que la salud de la población se vea afectada al estar expuesta a concentraciones de diferentes contaminantes, no solo el SO₂, causando efectos nocivos en la salud, esto se hace más grave ya que la evidencia actual sugiere que las personas con enfermedades subyacentes como la diabetes mellitus e hipertensión son más propensas a los efectos agudos ante la exposición a SO₂ (21) tomando en cuenta la prevalencia de estas enfermedades en el país.

Es necesario realizar esta evaluación porque generará evidencia científica para la toma de decisiones y la consiguiente actualización de la política pública en México debido a que no existe hasta el momento un trabajo que haya evaluado el impacto en salud de la normatividad vigente en México, tan desacorde con las recomendaciones internacionales, incluso la normatividad se sigue rebasando con implicaciones para la salud, hoy en día no existe una actualización en la Norma Oficial Mexicana posiblemente por la falta de evidencia científica, razón por la cual este proyecto puede proporcionar dicha evidencia para la actualización y generar información para la toma de decisiones en la protección de la salud de los mexicanos ante la mala calidad del aire.

Los valores establecidos en las guías de calidad de aire de la OMS sólo plantean parámetros para eventos agudos (promedios de 24 horas y 10 min) a diferencia de normatividad en México que aún mantiene parámetros de evaluación para un promedio anual, sin tener criterios de comparación con el resto de las normatividades internacionales.

La Evaluación de Impacto en Salud en materia de salud ambiental ha tenido gran desarrollo en los últimos años especialmente en la comunidad europea y en Estados Unidos de América, centrados especialmente en el ozono y material particulado, situación similar a lo ocurrido en América Latina, pero en relación al SO₂ son nulas las evaluaciones que se han realizado, aumentando la necesidad de conocer cuáles son los impactos en la salud en el México aún después de que se han implementado estrategias para proteger a la población de la exposición como la reducción de azufre en las gasolinas y diesel.

Objetivos.

General.

Estimar los impactos a la salud a través del número de muertes evitables ante el planteamiento de escenarios de reducción de la contaminación por SO₂ en las ciudades de México que monitorean el contaminante.

Específicos.

1. Identificar las ciudades que llevan a cabo monitoreo ambiental de SO₂ en México.
2. Estimar la exposición de la población, en ciudades que llevan a cabo monitoreo ambiental de SO₂ y bajo diferentes escenarios de reducción de la contaminación.
3. Seleccionar la Función Concentración Respuesta y frecuencia de los eventos en salud de interés, aplicables al área de estudio.
4. Estimar los impactos a la salud bajo los escenarios de análisis.

Materiales y Métodos.

El presente trabajo está basado en la metodología propuesta por la OMS para evaluar los impactos en salud por la implementación de medidas de control para hacer frente a la exposición a contaminantes ambientales, en este caso, como ya se ha mencionado, el objeto de estudio es el SO₂, mediante el análisis de fuentes de datos secundarias.

El año base para la elaboración la EIS fue el 2013, por ser las bases más actuales con que contaba el INECC al momento de la solicitud de las mismas. La presente EIS se realizó para dos horizontes temporales u enfoques, un agudo, dado que los eventos a la salud más reportados son los daños que ocasiona la exposición a periodos cortos, por eso se eligió como estimador el promedio de 24 horas para evaluar la temporalidad aguda. El otro enfoque de esta EIS fue el crónico, situación que obedeció al retraso de la normatividad ya comentado anteriormente que aún utiliza el promedio anual como una medida de referencia para conocer si la población está protegida a dichas concentraciones.

La Ilustración 3 sirvió como guía para describir a continuación los pasos seguidos para la elaboración de la evaluación.

Delimitación del área de estudio.

Tanto para el enfoque agudo y crónico la limpieza y validación de las bases siguió la secuencia que se describe a continuación:

El trabajo con las bases de monitoreo de SO₂ para el año base se realizó con R: *A Language and Environment for Statistical computing*, 2016 (R). La limpieza de datos consistió en asegurar que los registros no tuvieran errores, tales como datos incompletos, registros de más como días del año 2014, registros erróneos, (base de la red de Querétaro midió otro contaminante en lugar del SO₂), para posteriormente poder eliminar y sustituir en su caso cada error, a fin de que cada red de monitoreo del estudio tuviera la misma configuración y compatibilidad con el software de trabajo. La validación de la información permitió contar con la

suficiencia de datos requerida para el manejo de datos con la finalidad de cubrir los criterios de calidad y representatividad de los datos.

A continuación se detalla el proceso para la depuración de los datos.

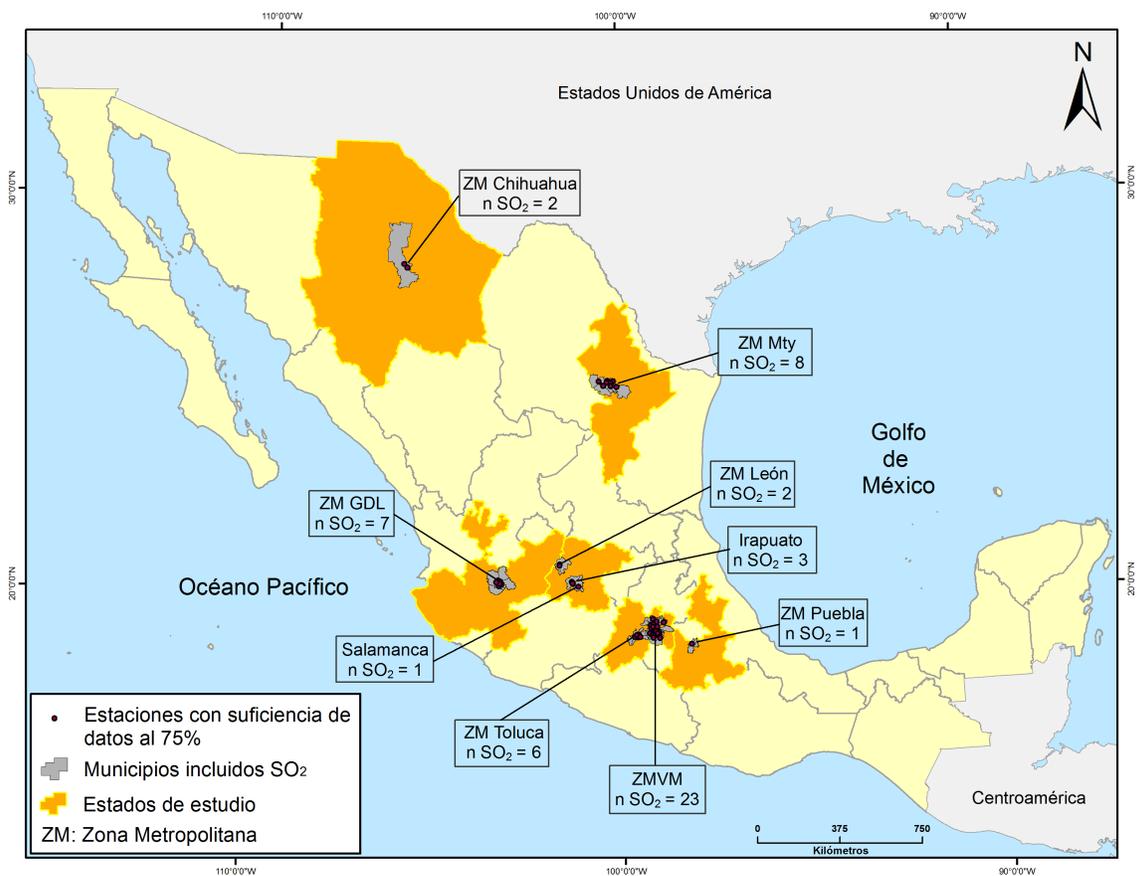
1. Se solicitaron las bases crudas al INECC del monitoreo de bióxido de azufre para el año 2013, por ser el más actual con el que contaba dicha institución.
2. Las bases crudas con datos de monitoreo se recibieron organizadas por entidad federativa donde se suponía que se medía el contaminante.
3. Los datos crudos estuvieron conformados por 88 estaciones de monitoreo distribuidas en 10 entidades federativas (Baja California, Chihuahua, Guadalajara, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Michoacán, Puebla, Querétaro y Yucatán). Cabe mencionar que las estaciones de Querétaro contaban con mediciones que correspondían a otro contaminante en la misma base, porque lo que no se tenía la certeza de saber cuál era realmente el contaminante medido por lo que se decidió eliminar esta red.
4. Se realizó limpieza de los datos para identificar información incorrecta como textos, datos vacíos, números mal capturados así como también se verificó la existencia de datos extremos que afectarían la distribución de la concentración.
5. Se generó para cada una de las estaciones que monitorearon SO₂: el promedio de 24 horas (365 registros) y promedio anual (un registro), a partir de datos horarios (8760 horas para un año) ya depurados, este proceso se llevó a cabo considerando el 50 y 75% de suficiencia de datos para cumplir con calidad en la generación de los promedios.
6. Al término de la limpieza el número de estaciones que resultaron con 50% de suficiencia de datos fue de 60 estaciones y 53 estaciones con el 75% de suficiencia.

El siguiente paso se realizó con *QGIS Development Team, 2.10.1. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*, que es un software utilizado en los Sistemas de Información Geográfica, para observar

el comportamiento de la distribución de las estaciones de monitoreo tanto con la suficiencia al 50 y 75%, encontrando que no había una ganancia importante en el número de estaciones con la suficiencia al 50%, por lo que se decidió utilizar la suficiencia al 75% ya que ofrece una mayor representatividad y calidad de los datos.

Se descargaron las capas de Estados, municipios y áreas geoestadística básica (AGEB) del Instituto Nacional de Geografía y Estadística para ser utilizadas en el programa.

Mapa 1. Estaciones de monitoreo en el área de estudio con datos validados al 75%, 2013.



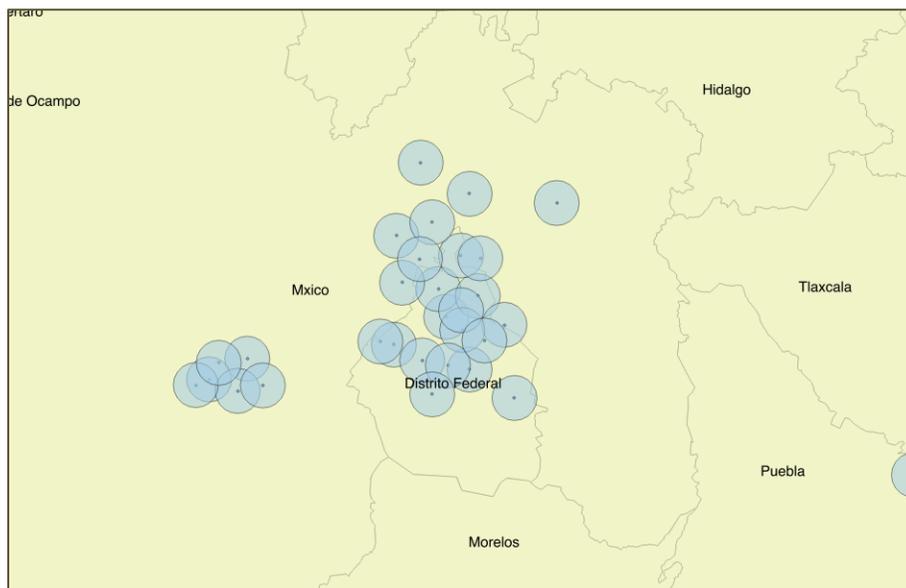
Fuente: elaboración propia a partir de los resultados

El Mapa 1 nos muestra las 53 estaciones de monitoreo de estudio, seleccionadas para la evaluación, distribuidas en 6 estados del país (Chihuahua, Nuevo León, Jalisco, Guanajuato, Estado de México y Distrito Federal).

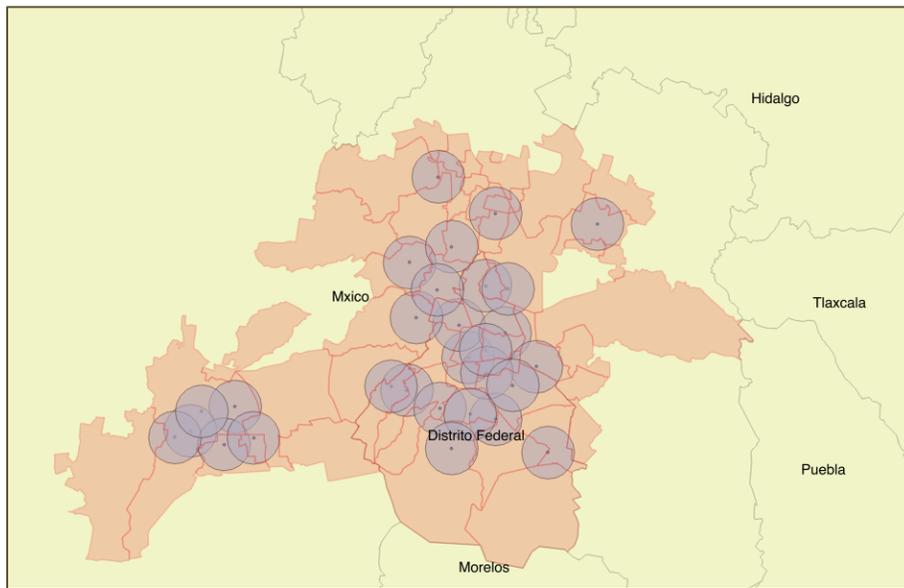
Selección de área de estudio (Municipios de análisis)

Para este proceso se utilizaron dos capas básicas de información que fueron las de municipios y buffers de 5km alrededor de cada estación de monitoreo (estaciones con suficiencia de información al 75%). Las siguientes imágenes muestran el geoproceso seguido para llegar a la definición de los municipios de análisis.

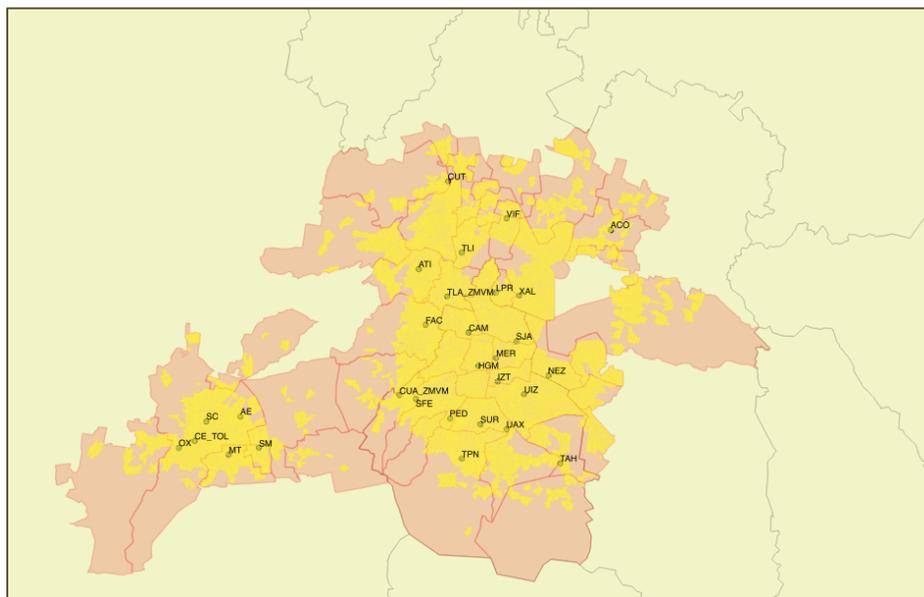
- Se generó un buffer de 5 km a cada estación válida (estaciones que tuvieron suficiencia del 75% de datos diarios para el cálculo de su promedio anual).



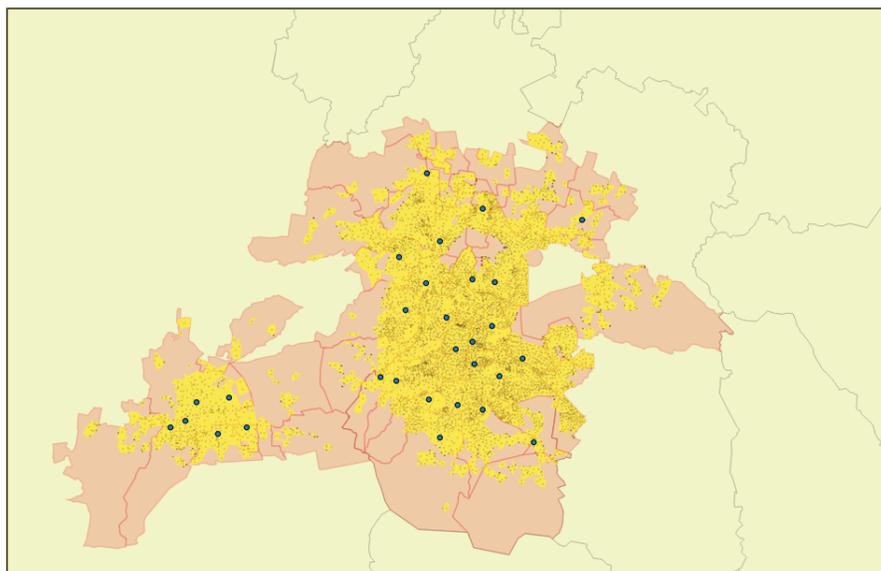
- Se intersectó la capa de buffers de 5km con la capa de municipios, los municipios seleccionados por la intersección fueron exportados como una nueva capa de información. La capa generada conformó a los municipios de análisis del presente estudio.



- La estimación a escala municipal requirió primero estimar la concentración a escala de Área Geostatística Básica (AGEB) y posteriormente agregar los resultados a escala Municipal. Para esto fue necesario agregar la capa de AGEB al SIG.



- Se generó una nueva capa con los centroides de cada AGEB. La concentración fue estimada para cada punto y posteriormente se agregó el resultado a escala municipal.



Los pasos anteriores permitieron identificar que el área de estudio final estuvo conformada por 76 municipios con sus correspondientes 10,690 AGEBs.

Estimación de la exposición a SO₂

Para poder estimar la concentración a la que estuvieron expuestos el área de estudio se partió del estimador de exposición que se generó en la etapa anterior, el promedio de 24 horas para el enfoque agudo y el promedio anual para el enfoque crónico.

Enfoque crónico.

Se utilizó el estimador del promedio anual para calcular el promedio ponderado por la distancia en cada municipio, solo una vez ya que se trata de un solo registro para el año base.

En el software R se realizaron los siguientes procesos:

1. Se seleccionaron centroides en intersecciones de buffer de 5 km a las estaciones válidas.
2. Se calculó la concentración mediante el promedio ponderado por distancia al cuadrado (IDW) de cada estación que generó los buffers en intersección.
3. Se procedió a repetir los pasos anteriores con un Buffer de 10 km excluyendo a los centroides ya estimados en el geoproceso anterior.
4. A las AGEBs sin intersección se le asignó la concentración de la estación más cercana.
5. Finalmente la concentración estimada para cada AGEB se agregó por municipio. Este paso se obtuvo sumando todos los IDW en cada AGEB para obtener así una estimación de la exposición anual municipal ponderada por la distancia para el año base.

Este proceso permitió conocer cuál es la concentración en cada uno de los municipios de estudio, mediante el promedio ponderado por el inverso de la distancia, para finalmente conocer cuál fue la concentración a la que estuvo expuesta la población el área de estudio.

Enfoque agudo.

Se partió del estimador del promedio 24 horas; todos los pasos del proceso que se realizaron en R para el enfoque crónico también se realizan en este enfoque, con la diferencia que este proceso se llevó a cabo 365 veces, es decir se estimó el IDW de cada día del año base, para tener una estimación de la exposición diaria.

Selección del escenario de exposición

Se realizó una revisión de la literatura de estudios epidemiológicos, normatividad nacional y recomendaciones internacionales como las de la OMS, es un organismo facultado para emitir recomendaciones de concentraciones máximas de exposición a no ser rebasados para mantener la protección a la salud.

Escenarios para enfoque crónico.

A diferencia de lo que dicta la Organización Mundial de la Salud, la Normatividad en México aún utiliza el promedio anual de la concentración de bióxido de azufre como un parámetro para medir la contaminación del aire, por lo que se consideró oportuno evaluar el cumplimiento de este límite máximo permisible.

De esta manera, los escenarios de reducción son un planteamiento hipotético, por ende en este enfoque se evaluó cuántas muertes se podrían evitar ante una reducción hipotética del 50% de la contaminación que se presentó en el 2013 en cada uno de los municipios.

Se decidió únicamente un escenario de reducción del 50% por que como se mencionó no hay un parámetro de comparación para el promedio anual en la OMS y porque más del 50% de los registros de las estaciones de monitoreo se encontraban en ese percentil.

Escenario para enfoque agudo.

A diferencia del promedio anual, las concentraciones de los promedios de 24 horas tienen un referente para su comparación en las Guías de Calidad del Aire de la OMS. Por lo tanto la EIS realizada para este enfoque utilizó como primer escenario el valor guía para el promedio de 24 horas de la OMS, como segundo escenario se planteó el valor de la NOM, el cual está 10 veces por arriba de las Guías de la OMS. Por lo tanto los escenarios para estimar los beneficios en salud, bajo el enfoque agudo fueron:

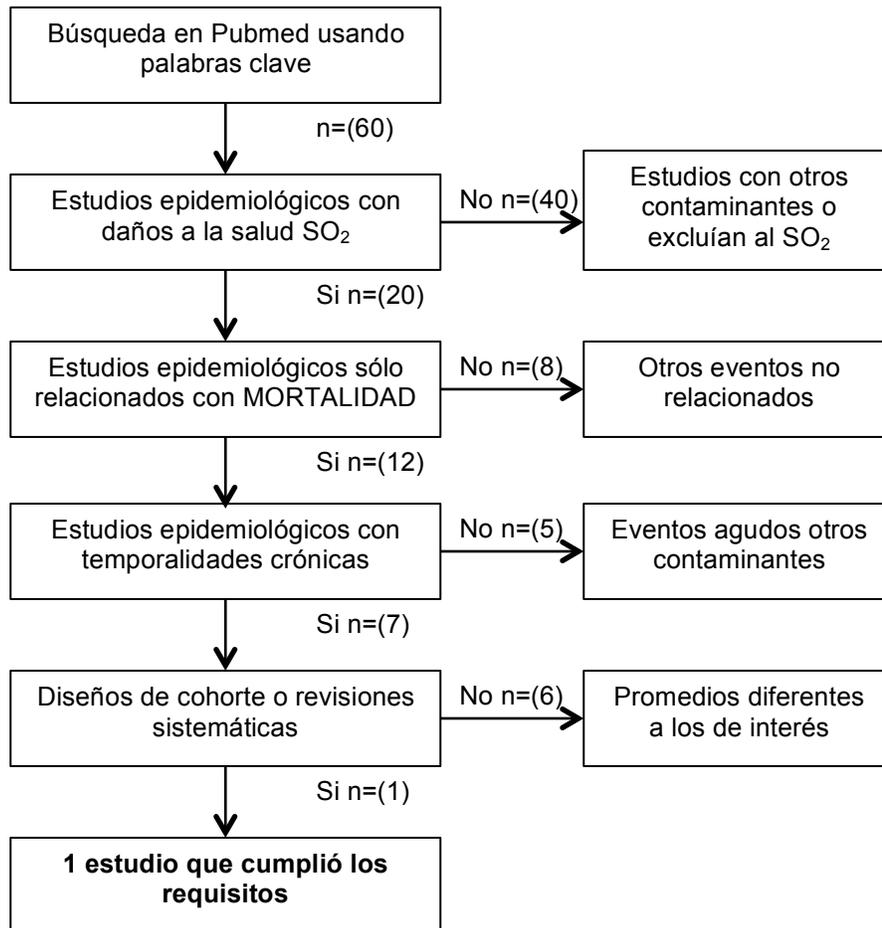
- Escenario 1 agudo: OMS 0.008 ppm
- Escenario 2 agudo: NOM 0.110 ppm

Selección de la Función Concentración Respuesta (FCR)

Con la finalidad de identificar estimadores de efecto reportados en la literatura científica para diversos eventos en salud, tanto para el enfoque crónico y agudo se procedió a realizar una revisión en el portal *Pubmed* con las siguientes palabras

clave: *sulfure dioxide, effects, air pollution* y SO₂. Se revisaron estudios publicados entre 2009 y 2015. Se seleccionaron los estudios más relevantes (diseño de series de tiempo y cohorte son significancia estadística y consistencia), se identificaron estudios que reportaron el efecto provocado por la exposición a SO₂ en la salud de la población, por causas y grupos de edad.

Figura 1. Algoritmo para la selección de FCR



El proceso para la selección de la medida de asociación para evaluar el riesgo al que está expuesta la población de estudio se muestra en la Figura 1.

La mayoría de los estudios epidemiológicos dirigidos a estudiar el efecto en la salud asociados al bióxido de azufre son realizados de manera general, dejando de lado variables importantes como lo son la población vulnerable, el daño en los niños menores de 5 años y la afectación en los mayores de 65 años, que es la población que aporta el mayor número de casos de mortalidad sobre todo la relacionada con la mortalidad cardiovascular y respiratoria. Por lo tanto en esta EIS no se pudo conocer el impacto en la población vulnerable.

Frecuencia de los eventos en salud de interés

Los eventos en salud son aquellos daños a la salud que ocasiona el bióxido de azufre que reportan la evidencia generada a través de los estudios epidemiológicos y en este caso los eventos encontrados en la FCR seleccionada para esta evaluación. Esta evaluación utilizó datos de mortalidad, descargados del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS) para el año base, dichas bases se limpiaron y depuraron con el programa Excel.

Enfoque crónico.

Para evaluar la temporalidad anual se descargaron tres eventos en salud, según los códigos de la Clasificación Internacional de las Enfermedades (CIE 10), para el año base, según la siguiente codificación de acuerdo al estudio seleccionado para la FCR.

1. Mortalidad general, para todas las edades. (A00-R99).
2. Mortalidad Cardiovascular, todas las edades. (I00-I99).
3. Mortalidad Respiratoria, todas las edades.(R00-R99).

Enfoque Agudo.

Para el enfoque agudo se tomó en cuenta solo la mortalidad general para todas las edades (A00-R99). Al no contar con datos de mortalidad desagregados de manera diaria, se decidió dividir la mortalidad general del año base entre 365 días para tener un estimado de la mortalidad por día.

Estimación de los impactos en salud

Una vez identificados la población expuesta, la exposición por municipio, las FCR de eventos de interés y sus tasas de mortalidad en la población, se calculó el número de muertes que pudieran ser atribuibles a la exposición al SO₂ en relación a los escenarios de reducción hipotéticos. Se utilizaron un Riesgos Relativos (FCR) corregidos por una unidad de cambio que es una medida de asociación ante la exposición al bióxido de azufre, en aire ambiente.

El riesgo relativo se corrigió mediante la siguiente formula:

Formula 1. Riesgo Relativo corregido

$$RRc = e^{Ln(RR\ publicado / Unidad\ de\ cambio)}$$

Donde:

RR publicado : riesgo relativo publicado.

Unidad de cambio: Unidad de cambio de donde deriva el RR.

Δexp : es el cambio de concentración previsto para el escenario de reducción.

La fórmula para la estimación de las muertes evitables es la utilizada tanto para el enfoque agudo y crónico con las diferencias que se detallan más adelante es:

Formula 2. Estimación de las muertes evitables

$$ME = Nm - \frac{Nm}{exp^{[(RRc) * \Delta conc\ SO2]}}$$

Donde:

ME : Las muertes evitables por escenario de reducción

Δconc SO2: La diferencia aritmética de la concentración de exposición estimada menos el escenario de reducción hipotético en la exposición.

RRc : riesgo relativo corregido por unidad de cambio.

Nm: son las muertes por la causa evaluada (o el evento en salud evaluado)

Tabla 5. Diferencia entre los enfoques para la estimación de las muertes evitables

Variable de la fórmula	Enfoque agudo	Enfoque crónico
<i>Δconc SO2</i>	Diferencia de la concentración de exposición estimada menos <ul style="list-style-type: none"> • Escenario 1 agudo 0.008 ppm • Escenario 2 agudo 0.110 ppm 	Reducción hipotética del 50% de la concentración de exposición estimada
<i>FCR: RRc</i>	1.007(1.004-1.009) por 10 μg/m ³	1.018(1.013-1.023) por 10 μg/m ³ 1.032(1.023-1.040) por 10 μg/m ³ 1.015(1.003-1.028) por 10 μg/m ³
<i>Nm</i>	Número de muertes diarias ocurridas durante el 2013 *Con fines de presentación de los resultados, las muertes evitables diarias ocurridas durante todo el año 2013, fueron sumadas.	Número de muertes en todo el año 2013

Resultados.

Delimitación del área de estudio

El área de estudio se conformó por 76 municipios con una población de 34,492,598 habitantes según las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) que representan 29% de la población total del país para el año base.

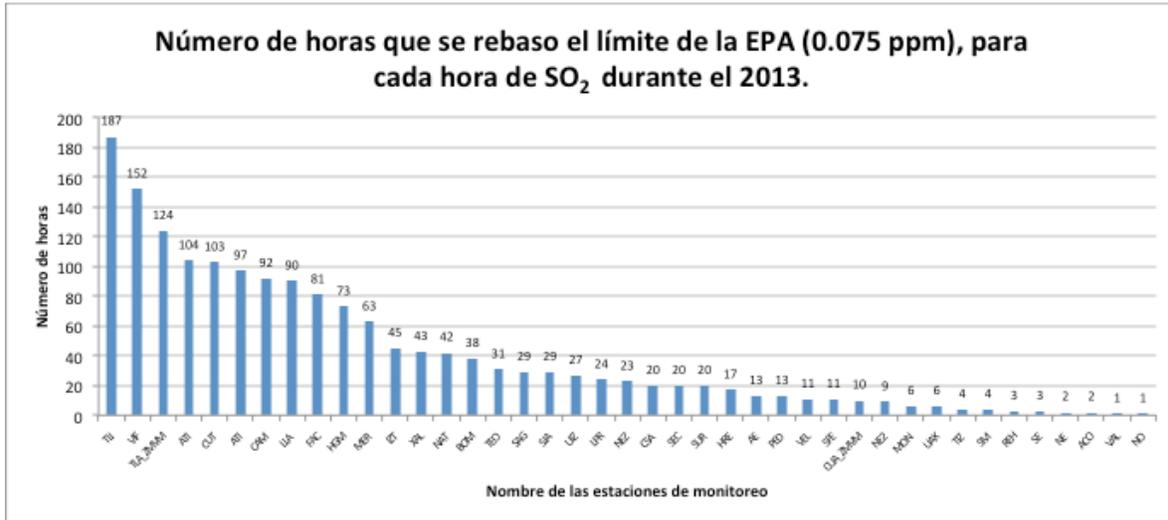
Se abarcaron 5 zonas Metropolitanas del país, mencionando que dichas zonas no están constituidas en un 100% por todos los municipios integrantes, pero si la mayoría en la Zona metropolitana del Valle de México, Toluca, Guadalajara, Puebla-Tlaxcala y Monterrey. Los municipios que no pertenecen a ninguna zona metropolitana pero que sí se abarcaron fueron León, Salamanca, Irapuato y Chihuahua.

Estimación de la exposición a SO₂

En el año 2013 la concentración de SO₂ en los registros horarios estuvo en varias estaciones por arriba de los límites establecidos por la EPA (0.075 ppm), resaltando que las que más horas malas tuvieron se encuentran en la ZMVM y las estaciones del estado de Irapuato y Salamanca, caso contrario a las estaciones de la zona metropolitana de Guadalajara con 0 horas malas.

El número de registros horarios rebasado del contaminante se reflejan en Gráfica 1 durante todo el 2013, se muestran únicamente las estaciones que tuvieron horas malas. Como ya se ha mencionado las exposiciones agudas al bióxido son las más relacionados con eventos adversos a la salud.

Gráfica 1. Número de horas que se rebasó el límite de la EPA para el promedio de 1 hora en el 2013, en las estaciones de monitoreo.



Nota: 8760 registros conforman un año calendario. Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados del INECC.

El promedio de 24 horas de SO₂ en relación a la normatividad mexicana no mostró problemática, ya que el promedio se mantuvo dentro de los límites establecidos en la norma durante todos los días del año 2013, situación contraria a lo que sucede si este límite fuera el valor que recomienda la OMS, puesto que en casi todas las estaciones de monitoreo se tuvieron días que pasan dicho nivel (0.008ppm). Algunas estaciones dentro de la zona metropolitana de Guadalajara no tuvieron ningún día malo dentro del año 2013. Cabe destacar la situación que se observa en la estación Nativitas ubicada en Salamanca, Guanajuato, la estaciones AE en la red Toluca y SO en la red Monterrey, rebasando varios días los valores guía propuestos por la OMS para la protección de la salud en un promedio de 24 horas (Gráfica 2). Observando de nuevo que la Normatividad nacional es muy permisiva en los límites máximos establecidos.

Tabla 6. Lista de Municipios por orden descendiente con la concentración estimada anual ponderada por distancia.

Número	Municipio	Entidad	Concentración ponderada por distancia (ppm)
1	Salamanca	Guanajuato	0.0178
2	Otzolotepec	Edo. México	0.0109
3	Lerma	Edo. México	0.0090
4	Atizapan De Zaragoza	Edo. México	0.0087
5	Tultitlan	Edo. México	0.0086
6	Nicolas Romero	Edo. México	0.0085
7	Santa Catarina	Edo. México	0.0085
8	Cuautitlan Izcalli	Edo. México	0.0083
9	Coacalco De Berriozbal	Edo. México	0.0081
10	Azcapotzalco	Distrito Federal	0.0080
11	San Mateo Atenco	Edo. México	0.0080
12	Jaltenco	Edo. México	0.0080
13	Nextlalpan	Edo. México	0.0080
14	Tonanitla	Edo. México	0.0080
15	Tlalnepantla De Baz	Edo. México	0.0080
16	San Pedro Garza Garca	Nuevo León	0.0079
17	Cuautitlan	Edo. México	0.0079
18	Tultepec	Edo. México	0.0079
19	Ocoyoacac	Edo. México	0.0079
20	Apodaca	Edo. México	0.0078
21	Toluca	Edo. México	0.0075
22	Metepec	Edo. México	0.0075
23	Melchor Ocampo	Edo. México	0.0075
24	San Nicolas De Los Garza	Nuevo León	0.0073
25	Gral. Escobedo	Nuevo León	0.0071
26	Naucalpan De Jurez	Edo. México	0.0071
27	Miguel Hidalgo	Distrito Federal	0.0070
28	Cuauhtemoc	Distrito Federal	0.0070
29	Zinacantepec	Edo. México	0.0069
30	Coyotepec	Edo. México	0.0069
31	Teoloyucan	Edo. México	0.0069
32	Tepetzotlan	Edo. México	0.0069
33	Monterrey	Nuevo León	0.0067
34	Ecatepec De Morelos	Edo. México	0.0066
35	Cadereyta Jimenez	Nuevo León	0.0065
36	Juarez	Nuevo León	0.0064
37	Gustavo A. Madero	Distrito Federal	0.0063
38	Benito Juarez	Distrito Federal	0.0062
39	Guadalupe	Nuevo León	0.0062

Número	Municipio	Entidad	Concentración ponderada por distancia (ppm)
40	Venustiano Carranza	Distrito Federal	0.0061
41	Iztacalco	Edo. Mexico	0.0059
42	Chihuahua	Chihuahua	0.0057
43	García	Nuevo León	0.0053
44	Nezahualcoyotl	Edo. México	0.0053
45	Chimalhuacán	Edo. México	0.0050
46	La Paz	Edo. México	0.0050
47	Coyoacán	Distrito Federal	0.0049
48	Huixquilucan	Edo. México	0.0049
49	Iztapalapa	Distrito Federal	0.0048
50	Tecmac	Edo. México	0.0046
51	Alvaro Obregón	Distrito Federal	0.0046
52	Cuajimalpa De Morelos	Distrito Federal	0.0046
53	La Magdalena Contreras	Distrito Federal	0.0041
54	Irapuato	Guanajuato	0.0041
55	Tlahuac	Distrito Federal	0.0037
56	Tlalpan	Distrito Federal	0.0037
57	Xochimilco	Distrito Federal	0.0036
58	Valle De Chalco Solidaridad	Edo. México	0.0035
59	Milpa Alta	Distrito Federal	0.0035
60	Leon	Guanajuato	0.0033
61	Texcoco	Edo. México	0.0031
62	Amozoc	Puebla	0.0029
63	Puebla	Puebla	0.0029
64	San Pablo Del Monte	Tlaxcala	0.0029
65	Acolman	Edo. México	0.0026
66	Chiautla	Edo. México	0.0026
67	Teotihuacán	Edo. México	0.0026
68	Tezoyuca	Edo. México	0.0026
69	Tlajomulco De Ziga	Jalisco	0.0024
70	El Salto	Jalisco	0.0023
71	Tlaquepaque	Jalisco	0.0021
72	Zapotlanejo	Jalisco	0.0019
73	Tonala	Jalisco	0.0019
74	Guadalajara	Jalisco	0.0017
75	Ixtlahuacán Del Río	Edo. México	0.0016
76	Zapopan	Jalisco	0.0013

Fuente: elaboración propia. Nota: los datos se encuentran listados en orden de mayor a menor de acuerdo a la concentración de SO₂

Funciones de concentración respuesta seleccionadas

La FCR es uno de los componentes más importantes en la estimación de las muertes evitables. Se dio preferencia a los estudios de tipo revisiones sistemáticas y/o meta-análisis. Se identificó que la evidencia proveniente de la mayoría de los estudios indican que existe un riesgo ante la exposición al SO₂ tanto para los efectos crónicos como agudos siendo éstos los más dañinos, pero que requieren aún de más investigación para identificar por ejemplo grupos vulnerables.

Tanto para la estimación de los efectos crónicos (Tabla 7) como agudos (Tabla 8) se seleccionó una función de concentración respuesta como resultado de una revisión sistemática realizada en China (a falta de estudios realizados en población mexicana) con 26 estudios distribuidos en 24 ciudades, con una concentración promedio anual de SO₂ de 0.005-0.081 ppm.(36)

Tabla 7. FCR elegida para evaluar el enfoque crónico.

Evento	RR	CIE 10
Mortalidad general	1.018(1.013-1.023)	A00-99
Mortalidad Cardiovascular	1.032(1.023-1.040)	I00-I99
Mortalidad Respiratoria	1.015(1.003-1.028)	R00-R98

Nota: Para todos los casos, RR por 0.003 ppm de unidad de cambio, en el grupo de todas las edades, temporalidad anual.
Fuente: Lai H-K, Tsang H, Wong C-M. Meta-analysis of adverse health effects due to air pollution in Chinese populations. BMC Public Health. 2013;13:360.

Tabla 8. FCR elegida para evaluar el enfoque agudo.

Evento	RR	CIE 10
Mortalidad general	1.007(1.004-1.009)	A00-99

Nota: Para todos los casos, RR por 0.003 ppm de unidad de cambio, en el grupo de todas las edades, temporalidad aguda Fuente: Lai H-K, Tsang H, Wong C-M. Meta-analysis of adverse health effects due to air pollution in Chinese populations. BMC Public Health. 2013;13:360.

Frecuencia de los eventos en salud

Las tasa cruda de mortalidad general para el área de estudio fue de 4.88 por 1,000 habitantes y la tasa ajustada de 15.5 por 1,000 habitantes. La mayor distribución de las tasas se observaron en la ZMVM, debido probablemente a la densidad poblacional mostrada en esta zona para el año base.

Tabla 9. Tasas de Mortalidad en el área de estudio 2013

Mortalidad.	Tasa cruda x 1,000 hab.	Tasas ajustada x 1,000 hab.
General	4.88	15.26
Cardiovascular	1.30	4.16
Respiratoria	0.47	1.50

Fuente: elaboración propia, a partir de los datos.

Estimación de los impactos en salud.

Enfoque crónico.

El total de muertes evitables (Tabla 10) por zona metropolitana según el escenario de estudio, indican que usando la FCR de Lai en un 50% de reducción de la contaminación es posible evitar 2,059 muertes por año en toda el área de estudio, esto es 6 muertes por cada 100,000 habitantes. Desagregando por zona el mayor número de muertes que se podrían evitar si se redujese la contaminación al 50% por SO₂ se encontrarían en el Valle de México, esto debido igualmente a la densidad poblacional y a que algunas de las mayores concentraciones estimadas se encuentran en esta zona.

Tabla 10. Resultados en el año 2013 por una disminución del 50% en la contaminación en el enfoque crónico, expresadas como muertes evitables.

Mortalidad General	
Todas las edades	
Zona Metropolitana	No de muertes evitables (IC 95%)
Chihuahua	72(52-92)
Guadalajara	98(71-126)
León	53(39-68)
Salamanca	79(57-101)
Monterrey	322(235-411)
Puebla-Tlaxcala	70(52-90)
Toluca	138(99-175)
Valle de México	1,227(892-1566)
Total	2,059(1,497-2,629)

Las muertes evitables por causas específicas (Tabla 11 y Tabla 12), muestran que los mayores beneficios se dan en la mortalidad cardiovascular, que representan un 48% de la mortalidad general en esta evaluación. Por lo tanto si la contaminación se redujera en un 50% se podrían evitar en total 988 muertes por año a causa de eventos cardiovasculares.

Tabla 11. Resultados en el año 2013 por una disminución del 50% en la contaminación en el enfoque crónico, expresadas como muertes evitables.

Mortalidad Cardiovascular	
Todas las edades	
Zona Metropolitana	No de muertes evitables (IC 95%)
Chihuahua	40(29-49)
Guadalajara	45(32-56)
León	23(16-28)
Salamanca	35(26-44)
Monterrey	174(125-214)
Puebla-Tlaxcala	29(20-36)
Toluca	54(39-68)
Valle de México	588(428-729)
Total	988(715-1,224)

Tabla 12. Resultados en el año 2013 por una disminución del 50% en la contaminación en el enfoque crónico, expresadas como muertes evitables.

Mortalidad Respiratoria	
Todas las edades	
Zona Metropolitana	No de muertes evitables (IC 95%)
Chihuahua	5(1-10)
Guadalajara	9(1-17)
León	5(1-8)
Salamanca	7(1-12)
Monterrey	26(5-48)
Puebla-Tlaxcala	4(1-8)
Toluca	12(2-21)
Valle de México	98(19-181)
Total	166(31-105)

Tabla 13. Resumen de los resultados. Muertes evitables en el 2013 en un escenario de reducción de la contaminación del 50% en México

Evento	No de muertes evitables (IC 95%)
Mortalidad General	2,059 (1,497-2,629)
Mortalidad Cardiovascular	988 (715-1,224)
Mortalidad Respiratoria	166 (31-105)

Tabla 13 presenta el resumen del total de las muertes evitables para cada evento en salud evaluado a nivel nacional, así la mortalidad cardiovascular representa un 48% de la mortalidad general y un 4% a la mortalidad respiratoria, restando un 44% para el resto de las causas de mortalidad.

Enfoque Agudo.

Los resultados indican que usando la FCR de Lai, si los niveles de SO₂ en toda la zona de estudio fueran reducidos a partir de las concentraciones del 2013 a un promedio diario de 0.008 ppm como lo recomienda la OMS, es posible evitar un total de 80 muertes en el 2013 en toda la zona de estudio, resultado a partir de la suma de las estimaciones en la mortalidad diaria evitada en cada municipio evaluado.

Tabla 14. Resultados en el año 2013 para el escenario 1 agudo, expresadas como muertes evitables.

Mortalidad General	
Todas las edades	
Zona Metropolitana	No de muertes evitables(IC 95%)
Guadalajara	10(1-20)
León	1(0-3)
Monterrey	5(2-19)
Toluca	27(14-43)
Valle de México	37(8-106)
Total	80(25-191)

Para el segundo escenario agudo no se obtuvieron muertes evitables dado que los promedios de 24 horas no rebasaron ningún día los límites máximos permisibles establecidos en la NOM.

Discusión.

Los potenciales beneficios obtenidos a partir del escenario hipotético de reducción de un 50% de la concentración anual de SO₂ para el año de análisis revelan que el mayor número de muertes se observan en la ZMVM, esto se explica porque dicha zona es la más conurbada del país, las tasas de mortalidad son mayores en estos municipios, mayor número de fuentes móviles así como la fuerte presencia de zonas industriales en la parte norte de la ZMVM.

La evaluación de los eventos agudos, presenta que pueden evitarse 80 muertes si el nivel para la protección de la salud fuera más estricto, como el propuesto por la OMS, cabe señalar que en este trabajo también se evaluó el escenario del límite del promedio de 24 horas según la NOM, pero este al ser tan permisivo, y observando que todos los municipios evaluados estaban dentro de los límites establecidos, no se obtuvo ninguna muerte prevenible en el escenario 2 agudo.

La presente evaluación abarcó aproximadamente un tercio de la población del país de acuerdo a las proyecciones de CONAPO para el 2013, los resultados obtenidos están desagregados por Municipios y concentrados por zonas metropolitanas, cabe destacar que las zonas metropolitanas del Valle de México,

Toluca, Guadalajara y Monterrey se abarcaron casi en su totalidad por lo que los resultados nos permiten hacer una inferencia a gran escala en el país, por lo tanto reducciones de la contaminación en el resto del país obviamente evitarían un mayor número de muertes.

La validez de los datos dependió del alcance en cuanto al número de estaciones de monitoreo que miden el bióxido de azufre, lo que representó que al tratar de abarcar un mayor número de municipios no se pudo ampliar el área de estudio ya que se tuvo la limitante de que para el año de análisis solo 88 estaciones de monitoreo tuvieron datos válidos para el análisis.. A esta situación se le suma que durante el 2013 sólo dos estaciones cumplieron con más del 90% de suficiencia de datos, lo cual se ve reflejado en la calidad de la medición de cada una de las estaciones.

La selección de las FCRs es una parte fundamental en las EIS, pero existe poca información respecto al bióxido de azufre en cuanto a población vulnerable, dado que la mayoría de los estudios solo presentan resultados en la población en general lo que representa que la evidencia que existe en estos momentos solo permitió evaluar la mortalidad general, la cardiovascular y la respiratoria para todas las edades, sin poder conocer más acerca de estudios epidemiológicos que muestren los efectos en población vulnerable (niños menores de 5 años o adultos mayores). Aunado a lo anterior es necesario mencionar que no hay estudios que evalúen los daños a la salud en población nacional lo que nos llevó a utilizar una FCR realizada en población asiática, lo que podría estar sobre o sub estimando las muertes evitables, situación dada por la propia variabilidad entre las poblaciones, dependiente de la susceptibilidad de los habitantes, la distribución etaria y el nivel socioeconómico así como la propia mezcla de contaminantes y la propia incertidumbre del estudio.

Un supuesto que es importante mencionar es que para la evaluación del escenario agudo, al no contar con mortalidad desagregada por día se partió del total de casos anuales dividido entre 365 días, para contar con una estimación de mortalidad diaria. De igual manera se utilizaron las proyecciones de CONAPO

para el cálculo de las poblaciones por municipio al no contar con datos censales actuales.

Dentro de las propias limitaciones del estudio encontramos que los resultados finales son estimaciones y surgen de escenarios hipotéticos razón por la cual no deben tomarse como cifras exactas y sí como un ejercicio que resulta beneficioso al plantear nuevas hipótesis o programas preventivos encaminados a la reducción de la contaminación y por ende a la protección de la salud de las poblaciones.

Los resultados mostrados proporcionan evidencia científica que sirve de apoyo para el sustente la toma de decisiones para la necesaria actualización de la normatividad en el país. Hasta el momento no se contaba con dicha información para realizar una modificación a la norma. Aunque resultaría importante acompañar esta EIS de una evaluación económica que permita conocer el impacto de estas muertes sobre el gasto en salud a nivel nacional.

Como tal esta evidencia logró englobar todo el proceso que se requiere para concretar una Evaluación de Impacto en Salud, cumpliendo uno de los objetivos según la OMS, generando información para toma de decisiones ante la implementación de medidas preventivas o la evaluación de programas encaminados a la reducción de la contaminación.

La única EIS que se pudo identificar en la búsqueda de la literatura es una realizada en la ciudad de Teherán, la ciudad más poblada de Irán, la cual evaluó la mortalidad general en un escenario agudo utilizando igual el promedio de 24 horas, tendiendo como resultado 1400 muertes evitables para el año 2011. Es importante mencionar que la concentración anual de SO₂ a la que estuvo expuesta la población fue de 0.034 ppm, concentración más elevada a la estimada en nuestra población de estudio, cuestión que puede deberse a las condiciones climáticas, fuentes de origen, condiciones poblacionales entre otras.

En conclusión, este estudio pone en evidencia que la posible reducción de los niveles de contaminación del aire con SO₂ en México traería consigo una

importante reducción de la carga de mortalidad general, cardiovascular y respiratoria en la población; resultados que pueden ser utilizados para la toma de decisiones.

Recomendaciones.

1. Actualización de la NOM-022-SSA1-2010.

Nuestra legislación actual se encuentra desarticulada con lo actualmente recomendado por la guía de calidad del aire de la OMS y otras instancias internacionales. Se considera recomendable la eliminación del parámetro del promedio anual como un criterio para la evaluación de la calidad del aire y por lo tanto hacer más riguroso el criterio del promedio de 24 horas, recordando que este parámetro está 14 veces por arriba de lo que recomienda la OMS. Situación que resalta la importancia de establecer criterios más concordantes con la OMS, al ver que se podían evitar en promedio 80 muertes solo para la población de estudio de este trabajo para un solo año, aunado a esto que si se contara con más estudios que evaluaran la situación en poblaciones vulnerables y más aún en población mexicana el resultado sería mayor.

Esto quiere decir que en la próxima actualización de la normatividad nacional se debería establecer por lo menos un límite por debajo de 0.01 ppm para el promedio anual y un límite de 0.008 ppm. para el límite de 24hrs. Los cuales coinciden con los objetivos intermedios de las Guías de calidad del aire de la OMS en búsqueda de la protección de la salud de la población.

El escenario establecido mostró, que si existe una reducción del 50% en la contaminación se pueden evitar en promedio 2,059 muertes anuales, esto tan solo para la población de estudio de esta evaluación, lo cual realmente puede ser mayor si se hiciera a nivel nacional, si se considera que la mayor parte de la mortalidad está representada en la población de mayor de 30

años, la muertes evitables recaen sobre la clase funcional dando un significado económico si se evitaran este número de muertes por año.

2. Mejorar el monitoreo atmosférico de SO₂.

Dando cuenta de que a mayor calidad en la medición mejores serán las estimaciones que se puedan realizar de cualquier contaminante en cuestión.

4. Fortalecer la investigación epidemiológica en México.

Aumentar las investigaciones epidemiológicas sobre los riesgos ante la exposición al bióxido de azufre permitirá tener información valiosa particularmente sobre los grupos vulnerables (menores de 5 años y adultos mayores) y una mejor caracterización de la situación del bióxido de azufre para integrar nuevas EIS.

Consideraciones éticas.

El proyecto terminal es un análisis de bases de datos secundarias, de acceso libre (públicas) las cuales se pueden descargar de su página web oficial.

<http://www2.inecc.gob.mx/dgicurg/calair/tend/concentra.php>

<http://www.sinais.salud.gob.mx/basesdedatos/cubos.html>

Según el Reglamento de Investigación de la Ley General de Salud en conforme al artículo 17, Investigación sin riesgo, al no manipularse ninguna variable fisiológica, psicológica o social de individuos.

Bibliografía

1. Chen B, Kan H. Air pollution and population health: a global challenge. *Environ Health Prev Med.* marzo de 2008;13(2):94–101.
2. OMS. Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. 2014.
3. OMS. Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012. 2014.
4. Arah OA, Westert GP, Delnoij DM, Klazinga NS. Health system outcomes and determinants amenable to public health in industrialized countries: a pooled, cross-sectional time series analysis. *BMC Public Health.* 2005;5:81.
5. Laumbach Rj. Outdoor Air Pollutants and Patient Health. *Am Fam Physician.* el 15 de enero de 2010;81(2):175–80.
6. Baccini M, Biggeri A, Grillo P, Consonni D, Bertazzi PA. Health impact assessment of fine particle pollution at the regional level. *Am J Epidemiol.* el 15 de diciembre de 2011;174(12):1396–405.
7. Bell ML, Ebisu K, Peng RD, Samet JM, Dominici F. Hospital admissions and chemical composition of fine particle air pollution. *Am J Respir Crit Care Med.* el 15 de junio de 2009;179(12):1115–20.
8. Schwela D. Air pollution and health in urban areas. *Rev Environ Health.* junio de 2000;15(1-2):13–42.
9. Reno AL, Brooks EG, Ameredes BT. Mechanisms of Heightened Airway Sensitivity and Responses to Inhaled SO₂ in Asthmatics. *Environ Health Insights.* el 1 de abril de 2015;9(Suppl 1):13–25.
10. Brunekreef B, Holgate ST. Air pollution and health. *The lancet.* 2002;360(9341):1233–42.
11. Chen R, Huang W, Wong C-M, Wang Z, Thach TQ, Chen B, et al. Short-term exposure to sulfur dioxide and daily mortality in 17 Chinese cities: the China air pollution and health effects study (CAPES). *Environ Res.* octubre de 2012;118:101–6.
12. SSA. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO₂) NOM-022-SSA1-2010. 2009.
13. INE S. Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). Primera. México; 2011. 410 p.
14. INECC. Informe Nacional de Calidad del Aire 2013. 2014.
15. OMS. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. 2005.
16. Ley Federal Sobre Metrología y Normalización. 2014.
17. Shah AS, Langrish JP, Nair H, McAllister DA, Hunter AL, Donaldson K, et al. Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis. *Lancet.* el 21 de septiembre de 2013;382(9897):1039–48.
18. Bravo MA, Son J, de Freitas CU, Gouveia N, Bell ML. Air pollution and mortality in São Paulo, Brazil: Effects of multiple pollutants and analysis of susceptible populations. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* el 14 de enero de 2015;
19. Tong L, Li K, Zhou Q. Promoted relationship of cardiovascular morbidity with air pollutants in a typical Chinese urban area. *PloS One.* 2014;9(9):e108076.

20. Yang W-S, Wang X, Deng Q, Fan W-Y, Wang W-Y. An evidence-based appraisal of global association between air pollution and risk of stroke. *Int J Cardiol.* el 1 de agosto de 2014;175(2):307–13.
21. Goldberg MS, Burnett RT, Stieb DM, Brophy JM, Daskalopoulou SS, Valois M-F, et al. Associations between ambient air pollution and daily mortality among elderly persons in Montreal, Quebec. *Sci Total Environ.* el 1 de octubre de 2013;463-464:931–42.
22. Qian Y, Zhu M, Cai B, Yang Q, Kan H, Song G, et al. Epidemiological evidence on association between ambient air pollution and stroke mortality. *J Epidemiol Community Health.* agosto de 2013;67(8):635–40.
23. Amancio CT, Nascimento LFC. Association of sulfur dioxide exposure with circulatory system deaths in a medium-sized city in Brazil. *Braz J Med Biol Res Rev Bras Pesqui Médicas E Biológicas Soc Bras Biofísica Al.* noviembre de 2012;45(11):1080–5.
24. HEI Collaborative Working Group on Air Pollution, Poverty, and Health in Ho Chi Minh City, Le TG, Ngo L, Mehta S, Do VD, Thach TQ, et al. Effects of short-term exposure to air pollution on hospital admissions of young children for acute lower respiratory infections in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Res Rep Health Eff Inst.* junio de 2012;(169):5–72; discussion 73–83.
25. Huang X, Dai L, Lu P, Shang Y, Li Y, Tao Y, et al. [Time-series analysis on the acute mortality affected by air pollution, in the city of Guangzhou, 2004-2008]. *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi Zhonghua Liuxingbingxue Zazhi.* febrero de 2012;33(2):210–4.
26. Guo Y, Tong S, Li S, Barnett AG, Yu W, Zhang Y, et al. Gaseous air pollution and emergency hospital visits for hypertension in Beijing, China: a time-stratified case-crossover study. *Environ Health Glob Access Sci Source.* 2010;9:57.
27. Domínguez-Rodríguez A, Abreu-Afonso J, González Y, Rodríguez S, Juárez-Prera RA, Arroyo-Ucar E, et al. [Relationship between short-term exposure to atmospheric sulfur dioxide and obstructive lesions in acute coronary syndrome]. *Med Clínica.* el 18 de junio de 2013;140(12):537–41.
28. Krzyzanowski M, Cohen A, Anderson R. Quantification of health effects of exposure to air pollution. *Occup Environ Med.* diciembre de 2002;59(12):791–3.
29. Riojas-Rodríguez H, Álamo-Hernández U, Texcalac-Sangrador JL, Romieu I. Health impact assessment of decreases in PM10 and ozone concentrations in the Mexico City Metropolitan Area: A basis for a new air quality management program. *Salud Pública México.* diciembre de 2014;56(6):579–91.
30. INE. Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica. Instituto Nacional de Ecología; 2009. 82 p.
31. Berman JD, Fann N, Hollingsworth JW, Pinkerton KE, Rom WN, Szema AM, et al. Health benefits from large-scale ozone reduction in the United States. *Environ Health Perspect.* octubre de 2012;120(10):1404–10.
32. Orru H, Teinmaa E, Lai T, Tamm T, Kaasik M, Kimmel V, et al. Health impact assessment of particulate pollution in Tallinn using fine spatial resolution and modeling techniques. *Environ Health Glob Access Sci Source.* 2009;8:7.
33. Naddafi K, Hassanvand MS, Yunesian M, Momeniha F, Nabizadeh R, Faridi S, et al. Health impact assessment of air pollution in megacity of Tehran, Iran. *Iran J Environ Health Sci Eng.* 2012;9(1):28.
34. Pérez L, Sunyer J, Künzli N. Estimating the health and economic benefits associated with reducing air pollution in the Barcelona metropolitan area (Spain). *Gac Sanit SESPAS.* agosto de 2009;23(4):287–94.

35. Harris-Roxas B, Harris E. Differing forms, differing purposes: A typology of health impact assessment. *Environ Impact Assess Rev.* 2011;31(4):396–403.
36. Lai H-K, Tsang H, Wong C-M. Meta-analysis of adverse health effects due to air pollution in Chinese populations. *BMC Public Health.* 2013;13:360.