

Análisis espacial estimando regiones de riesgo por contaminantes que exceden con más frecuencia la norma en Guadalajara, México

Rubén Sánchez¹, Silvia Sánchez², Rubén Jacob Sánchez¹, Jaime Alcalá³, Gilberto Rubén Aguirre³
Departamento de Física¹, Departamento de Ciencias Naturales y Exactas², Instituto de Astronomía y Meteorología³
Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jal., México
rubensg@cencar.udg.mx, silviasandi@profesores.valles.udg.mx, raguirre@astro.iam.udg.mx

Abstract— This paper aims to find areas of environment hazard by high-level concentrations of air pollutants. We applied the spatial kriging interpolation method to study the spatial behavior of the ozone and the particulate matter with aerodynamic diameter less or equal than 10 μm in the Metropolitan Zone of Guadalajara. We used an 18-year (1996-2013) hourly observational record of these pollutants to estimate the concentrations in each grid point of an equally spaced grid. We estimated the conditional probability of exceeding the standard air quality given that the norm is exceeded in one monitoring station. The data analysis gives evidence of well-defined spatial hazard regions in the study area.

Keyword— *Ordinary kriging, hazard regions, urban ozone, particulate matter, space-time analysis, Metropolitan Zone of Guadalajara.*

Resumen— Este trabajo tiene como objetivo encontrar regiones de riesgo ambiental por concentraciones altas de contaminantes en el aire. Se aplica el método de interpolación espacial kriging para analizar el comportamiento del ozono y las partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Se utilizaron 18 años (1996-2013) de registros horarios de estos contaminantes y con ellos se estimaron las concentraciones en cada punto de una malla igualmente espaciada. Se estimó la probabilidad condicional de exceder la norma, dado que se excede en una de las estaciones de monitoreo. Los datos dan evidencia de regiones de riesgo ambiental bien definidas sobre la zona de estudio.

Palabras claves— *Kriging ordinario, regiones de riesgo, ozono urbano, partículas menores a 10 micras, análisis espacio-tiempo, Zona Metropolitana de Guadalajara.*

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en ciudades grandes, representa un problema serio de salud y calidad de vida a nivel mundial. Al revisar la literatura científica se pueden encontrar trabajos como el de Ostro (1984) quien investiga la relación de valores umbral en concentración de contaminantes con los datos de mortalidad en Londres o bien los resultados que presentan Pope, Bates & Raizenne (1995a), Pope et al. (1995b), Smith, Davis, Sacks, Speckman & Styer (2000) reportando los efectos de concentraciones altas de contaminantes del aire en la salud de la población y trabajos más recientes como el de Carey, Atkinson, Kent, Staa, Cook & Anderson (2013) en los que se establecen relaciones causa – efecto entre concentración de contaminantes del aire y mortalidad, hasta estudios como el de Schikowski et al. (2014) que reportan conclusiones a partir de la información recabada en varios artículos que estudian este tema. Estos trabajos acumulan evidencia suficiente para concientizarse del riesgo al que se somete una población expuesta a niveles altos de contaminantes del aire y han dejado evidencia de que la contaminación atmosférica causa serios problemas de salud.

Se pueden enumerar algunos factores que contribuyen a niveles elevados de contaminación atmosférica en una ciudad: los de tipo antropogénico que van desde el crecimiento acelerado de zonas urbanas, reducción de áreas verdes, parque vehicular en aumento constante y con automotores

relativamente viejos, así como instalaciones de parques industriales, en las proximidades de una ciudad, que sustituyen paulatinamente suelo natural por elementos urbanos; y factores naturales que se caracterizan principalmente por condiciones adversas a la dispersión de los contaminantes, que pueden ser geográficos por cerros y montañas alrededor de la ciudad, constituyendo una barrera horizontal o bien, aspectos meteorológicos adversos al flujo vertical de los vientos que conforman una barrera vertical natural a la dispersión de contaminantes, conocida como frontera superior de la *capa de inversión atmosférica* y fácil de apreciar al observar la ciudad a distancia o desde un punto elevado (figura 1).



Fig. 1. Frontera superior de la capa de inversión atmosférica.

Ante estos escenarios adversos, se han tomado estrategias como el uso de normas internacionales de calidad del aire, la admisión de planes de contingencia aplicables ante distintos niveles de contaminación, el uso de índices e indicadores de contaminación del aire, así como la instalación redes de monitoreo ambiental. Todo con el fin de tener un escrutinio constante de las concentraciones de las especies más dañinas y que afectan a la población, para mantenerla informada ante escenarios adversos. No obstante, el monitoreo informa de concentración de contaminantes en un número limitado de puntos distribuidos en la ciudad; de modo que, si se emite una alarma por niveles altos de contaminación, la población no tiene la información suficiente para tomar estrategias preventivas. Se puede saber que la norma de calidad del aire fue excedida sobre uno o más puntos de monitoreo, pero no hay certeza si los niveles de contaminación se exceden en otras zonas de la ciudad, distantes de los puntos con excedencias.

Partiendo de esto, muchas de las variables ambientales pueden medirse en un número infinito de puntos en una ciudad, desafortunadamente en la práctica esto no es posible. Variables importantes como concentración de contaminantes en el aire, se mide en unos pocos sitios de muestreo, principalmente por el costo que implica la instalación y mantenimiento de equipo avanzado de monitoreo ambiental. De modo que, si se requiere conocer el valor en sitios no muestreados, es necesario estimarlos a partir de las lecturas existentes en los puntos de observación.

El propósito de este trabajo es presentar los resultados del uso del método kriging ordinario para obtener una interpolación espacial de la concentración de contaminantes del aire, incorporando una malla más fina distribuida en la ciudad y presentar mapas de calidad del aire en la ciudad, con la posibilidad de identificar regiones de riesgo por niveles altos de contaminación en el aire. Tomando como ejemplo el caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), que se caracteriza por presentar elementos naturales adversos a la dispersión de contaminantes y por tener características antropogénicas favorables a los niveles altos de contaminación atmosférica.

A. Características de la zona de estudio

La ZMG, está integrada por los municipios de Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan (figura 2) a partir de 2004 se integraron Tlajomulco de Zúñiga, El Salto y posteriormente se adicionaron Juanacatlán e Ixtlahuacán de los Membrillos como municipios exteriores (Delimitaciones de las zonas metropolitanas de México, 2005). Concentra a más del 50% de la población estatal y esto genera agudas presiones sociales, demográficas y económicas que demandan espacios, infraestructura y servicios urbanos para atender las necesidades de una población que, al igual que otras metrópolis de México, ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas. Durante los años setenta se establecieron en Guadalajara numerosas industrias extranjeras entre las que sobresalen la fotografía, la cigarrera, la hulera y de productos químicos, que se agregaron a las industrias locales de producción de alimentos, bebidas y metalurgia.



Fig. 2. Localización de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

La ZMG se ubica en el centro del estado de Jalisco, a una latitud de $20^{\circ} 39' 54''$ N, longitud de $103^{\circ} 18' 42''$ W y una altitud promedio de 1,540 metros sobre el nivel medio del mar, se sitúa en la cuenca del Valle del Río Grande de Santiago, en los Valles de Atemajac y la Planicie de Tonalá, entre las zonas montañosas de la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Transmexicano. Las montañas que circundan la zona son: al noroeste la Sierra de San Esteban, al sureste la Serranía de san Nicolás y los conjuntos montañosos de Cerro escondido-San Martín y El Tapatío - La Reyna, al sur el Cerro del Cuatro-Gachupín-Santa María y al oeste la Sierra de la Primavera (figura 3). Estas sierras constituyen

parcialmente una barrera física natural para la circulación del viento, impidiendo el desalojo del aire contaminado fuera de la ZMG. El terreno donde se ubica la ZMG tiene pendientes variables con un promedio de 3% (Programa para mejoramiento la calidad del aire en la ZMG, 1997-2001) y al noreste de la ciudad se tienen alturas bajas (barrancas) de 100 a 200m sobre el nivel de la metrópoli.

Otra desventaja latente son las condiciones atmosféricas desfavorables a la dispersión, tales como clima cálido, combinación de estratificación estable, vientos débiles, provocando con ello mayores niveles en las concentraciones registradas. Recibe una abundante radiación solar debido a su latitud, lo que hace que la atmósfera sea altamente fotorreactiva y en presencia de luz solar los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno reaccionan fácilmente para formar ozono y otros oxidantes. (Programa para mejorar la calidad del aire de la ZMG 1997-2001).

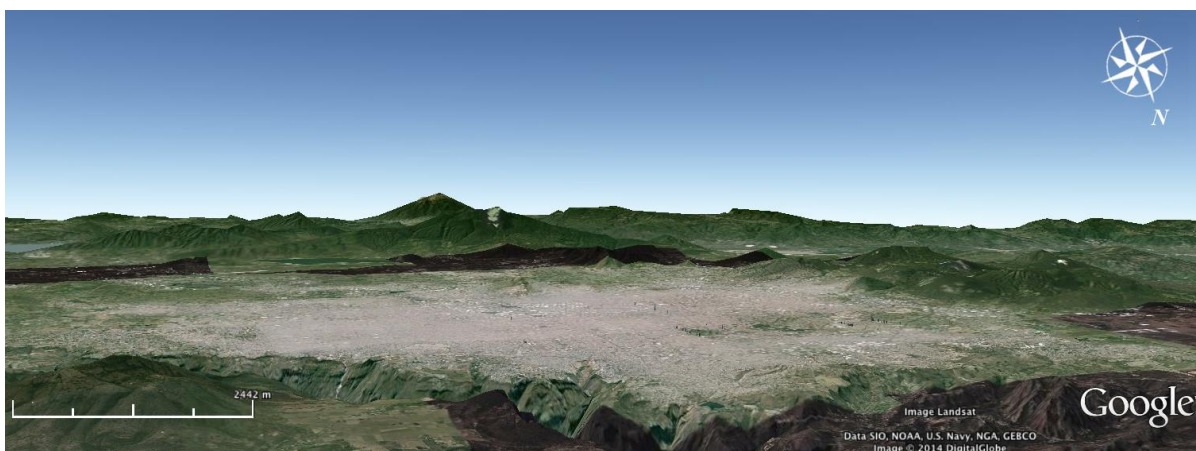


Fig. 3. Orografía de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

Tereshchenko y Sánchez (1996) analizaron el comportamiento vertical de la temperatura y del viento en la capa límite de la ZMG, dándole una atención especial a la estratificación de la inversión, ya que debilita fuertemente el intercambio turbulento en la atmósfera y como consecuencia, se reduce el traslado de especies contaminantes desde la superficie terrestre y capas cercana a ella, hasta capas superiores de la atmósfera. En su reporte afirman que la frecuencia de ocurrencia de inversión térmica en la ZMG es superior al 85% de los días, siendo los periodos de enero a junio y noviembre a diciembre cuando se presenta prácticamente todos los días, mientras que para los meses de julio a octubre, su frecuencia llega a ser menor al 50% de los días. Más aún, en la época de invierno (noviembre – febrero) se presentan invasiones de masas de aire frío y seco que penetran por la región norte del país y avanzan hacia la región central, llegando a extenderse hasta la ZMG; esto provoca descensos de temperatura y estratificación de las capas atmosféricas, intensificándose con ello el fenómeno de inversión térmica (Programa para mejoramiento la calidad del aire en la ZMG 1997-2001), que puede ser persistente y durar todo el día.

El espesor de la inversión térmica es típicamente de decenas a algunos cientos de metros, siendo mayor en la época de secas y relacionada con temperaturas de rupturas de cerca de 13°C para los meses más fríos del año (Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la ZMG, 1997), presentándose escenarios de dos o tres inversiones en un mismo día de modo que, puede romper solamente la inversión más próxima a superficie y los contaminantes quedan atrapados a nivel de superficie (Tereshchenko y Sánchez, 1997).

Por tanto, la ZMG reúne las características necesarias en términos de factores antropogénicos y naturales para alcanzar niveles alarmantes de contaminación atmosférica y en consecuencia, se han presentado excedencias a las normas de calidad del aire, siendo el ozono (O₃) y las partículas con diámetro menor o igual a 10 micras (PM₁₀) los contaminantes que rebasan con más frecuencia la norma (tabla 1). Destacando por ejemplo el reporte del Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la ZMG (1997) en donde se manifiesta que el O₃ rebasó la norma el 60% de los días del año en 1996 y que las PM₁₀ lo rebasaron en un porcentaje mayor. Más aún, estos dos contaminantes excedieron la norma de calidad del aire en 2009 (Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas, 2000–2009). De esta forma, la ZMG es un buen ejemplo para obtener mapas de calidad del aire, objetivo de este trabajo, que pueden ser de utilidad para quienes monitorean y administran la contaminación atmosférica.

Tabla I. Valores normados de los contaminantes que exceden con más frecuencia la norma.

Contaminante	<i>Exposición aguda</i>		<i>Exposición crónica</i>	<i>Norma</i>
	<i>Concentración</i>	<i>Frecuencia</i>		
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 hora)	Una vez cada	---	NOM-020-SSA1-1993
	216 µg/m ³	tres años		
Partículas con diámetro menor a 10µ (PM ₁₀)	120 µg/m ³ (en 24 horas)	Una vez al año	50 mg/m ³ (media aritmética anual)	NOM-025-SSA1-1993*

* Valor actualizado, Modificación a la NOM-025-SSA1-1993, SSA, 2005 (www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/025ssa193.html)

II. MATERIALES Y METODOS

La Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) administra y opera la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) que inició formalmente en 1993 con ocho estaciones fijas distribuidas en la zona de estudio y se incrementó a diez desde enero de 2013, esta red está distribuida como se muestra en la figura 4 y su georreferenciación se muestra en la tabla 2 (SEMADET, 2013).

En cada una de estas estación se registran y almacenan lecturas horarias de concentración de contaminantes criterio como el ozono (O₃ en ppm), óxidos de nitrógeno (NO_x, NO y NO₂ en ppm), bióxido de azufre (SO₂ en ppm), monóxido de carbono (CO en ppm), partículas con diámetro menor a diez micrómetros (PM₁₀ en µg/m³) y además cuenta con equipo meteorológico que reporta temperatura (°C), humedad relativa (%), precipitación (mm), velocidad (km/h) y dirección del viento (grados). La SEMADET (2013) reporta lectura de radiación solar (w/m²) en las estaciones Vallarta, Las Pintas y Santa Fe, e índice ultra violeta (UV) en la estación Vallarta, pero estos registros no están disponibles (SIMAJ, 2014).

De acuerdo a la documentación disponible, la SEMADET implementa procesos frecuentes de calibración del equipo instalado en las estaciones, en periodos no mayores a tres meses y se verifican además ceros/span, haciendo ajustes por lo menos una vez cada dos semanas, además un mantenimiento preventivo – correctivo (SEMADET, 2013); asegurando con esto los estándares de confiabilidad y validez de los datos.

Tabla II. Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (Fuente: SEMADET).

Municipio	Clave	Nombre	Estaciones de la RAMA		Altitud	Tipo	Año de Instalación
			Latitud	Longitud			
Guadalajara	CEN	Centro	20° 40' 25''E	-103° 19' 59'' N	1582	Urbana	1993
	MIR	Miravalle	20° 36' 52''E	-103° 20' 36'' N	1622	Urbana	1993
	OBL	Oblatos	20° 42' 01''E	-103° 17' 47'' N	1608	Urbana	1993
	VAL	Vallarta	20° 40' 48''E	-103° 23' 54'' N	1640	Urbana	1993
Zapopan	AGU	Las Águilas	20° 37' 51''E	-103° 25' 00'' N	1633	Urbana	1993
	ATM	Atemajac	20° 43' 10''E	-103° 21' 19'' N	1563	Urbana	1993
Tonalá	LDO	Loma Dorada	20° 37' 45''E	-103° 15' 50'' N	1645	Urbana	1993
Tlaquepaque	TLA	Tlaquepaque	20° 38' 27''E	-103° 18' 45'' N	1622	Urbana	1993
El Salto	LPIN	Las Pintas	20° 34' 36''E	-103° 19' 35'' N	1543	Semi Urbana	2012
Tlajomulco de Zúñiga	SFE	Santa Fe	20° 31' 44''E	-103° 22' 37'' N	1541	Urbana	2012

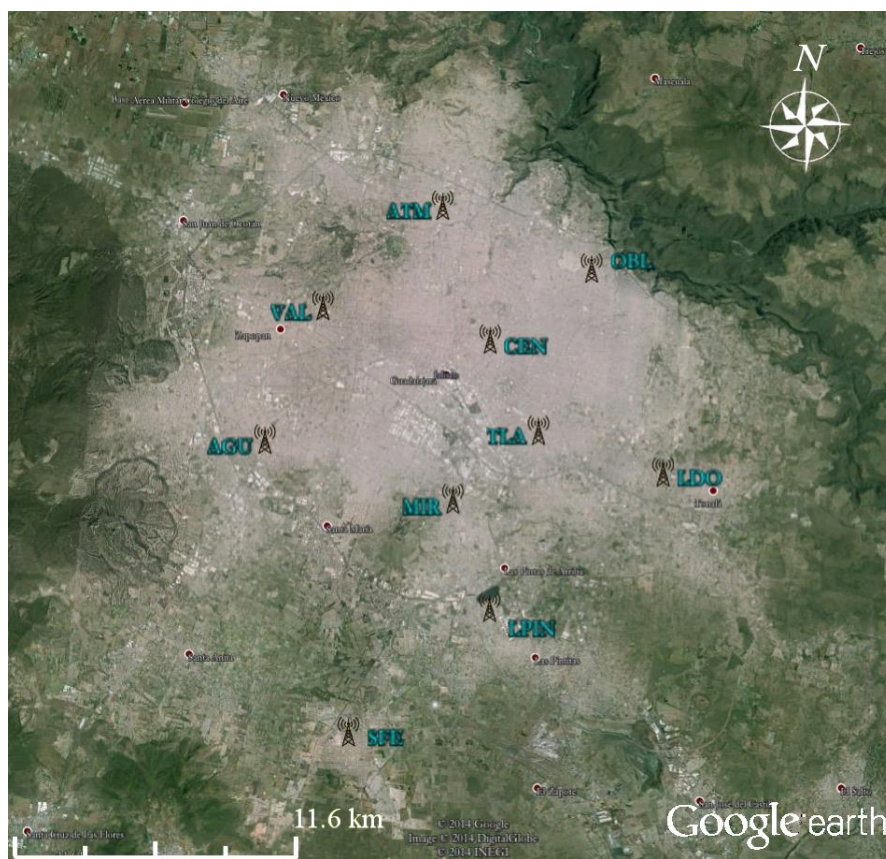


Fig. 4. Estaciones georreferenciadas de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

De esta forma, los datos disponibles en la RAMA (SIMAJ <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/Datos.html>) permiten examinar el periodo enero/1996 – diciembre/2011 con las ocho estaciones que iniciaron su funcionamiento desde 1993; incorporar al estudio la estación LPIN con los registros de nueve estaciones en el año 2012 y revisar la ZMG con los datos observados en las diez estaciones durante 2013. En donde la base de datos pasó un análisis estadístico de calidad explorando casos de lecturas perdidas y valores

negativos, cuidando principalmente el análisis de lecturas extremas o valores muy grandes como puntos atípicos.

A. *Interpolación espacial, kriging ordinario*

El uso de la interpolación espacial en problemas ambientales ha crecido en años recientes y en el caso específico, el método kriging es una herramienta de interpolación espacial sobre datos dispersos en una superficie, que ha probado ser muy útil en distintos campos de investigación (Burgess y Webster, 1980), en donde se aprovecha principalmente la correlación espacial de una magnitud observada en distintos puntos de una región, mediante el variograma dado por

$$Z_k^* = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \dots + \lambda_n Z_n,$$

en donde el valor no observado Z_k^* se obtiene a partir de las n localidades observadas Z_i y los pesos λ_i , λ_i se calculan asegurando el mejor estimador lineal insesgado, de modo que $E[Z_k^* - Z_k]^2$ sea mínimo, sujeto a la restricción $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1$. Más aún, si R es la matriz $n \times n$ dada por

$$R = Cov(Z_i - Z_j),$$

y

$$c = [Cov(Z_k - Z_j), Cov(Z_k - Z_j), \dots, Cov(Z_k - Z_j)],$$

el problema se reduce a resolver el producto matricial

$$Z_k^* = cR^{(-1)}Z^t, \tag{1}$$

en donde $Z = Z_1, Z_2, \dots, Z_n$, t denota transpuesta, (-1) representa la inversa de la matriz R (Vazquez, Fleury y Walter, 2006) y el vector c corresponde al variograma estimado a partir de la propuesta de Cressie y Hawkins (1980), implementando el mejor modelo, en términos de menor error cuadrado medio y efecto nugget, entre los más comunes para el ajuste del variograma (Sánchez, Calderón, Fregoso, Brito, Rujano y Sánchez, 2010).

Para este estudio se toma una malla de alta resolución sobre la ZMG, considerando puntos igualmente espaciados en el cuadro delimitado por $[-103.55, -103.15]$ grados de longitud y $[20.425, 20.825]$ grados de latitud, ambos con un tamaño de paso de 0.003 grados (equivalente a 335m aproximadamente), por lo que los resultados se muestran en una retícula de 133 por 133 puntos en longitud y latitud. Así, la interpolación kriging ordinario proporciona una estimación horaria de la concentración de contaminantes en 17,689 sitios no muestreados. Estos datos estimados dan la posibilidad de observar el comportamiento espacial del contaminante en la malla de alta resolución y con las estimaciones horarias se localizan regiones que sobrepasan la norma de calidad del aire, identificando condiciones favorables a niveles elevados de concentración de contaminantes, siempre y cuando al menos una de las estaciones presenta concentraciones de O_3 o PM_{10} que rebasan las normas de calidad del aire, es decir, se calcula la probabilidad de exceder la norma dado que se sobrepasa al menos en una de las estaciones de monitoreo ambiental. Así, al revisar por separado los casos en que se localizan regiones de riesgo, se calcula la probabilidad espacial conjunta de excedencias de calidad del aire o *probabilidad regional de riesgo ambiental*, permitiendo ubicar zonas de riesgo a concentraciones altas de contaminantes del aire en la ZMG, bajo condiciones que favorecen niveles altos de contaminantes.

III. RESULTADOS

Una observación general del estudio, es que tanto el O_3 como las PM_{10} muestran zonas de riesgo bien definidas al interior de la ciudad y con valores altos de probabilidad regional de riesgo ambiental, en donde las zonas de riesgo varían en ubicación y tamaño con base al periodo temporal que se analiza, encontrando diferencias inclusive entre los contaminantes analizados.

Revisando por ejemplo en forma mensual, en la figura 5 se muestran las regiones de riesgo estimadas con los datos registrados en los primeros cuatrimestres del periodo 1996 – 2011, destacando una región al sur de la estación Atemajac con probabilidad regional de riesgo ambiental superior a 0.75 en los meses de enero, febrero y marzo.

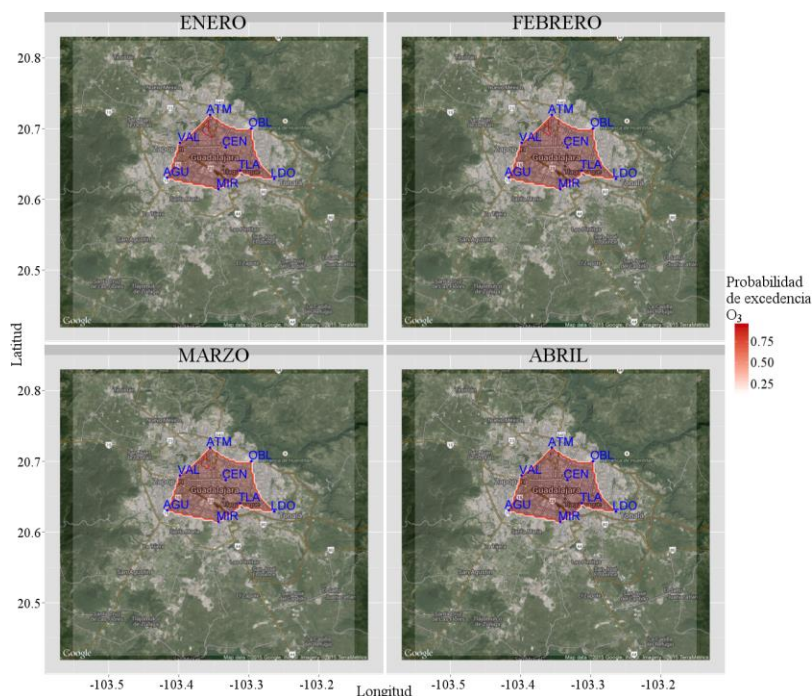


Fig. 5. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O_3 , primer cuatrimestre del periodo 1996 – 2011.

En la figura 6 se muestran las regiones correspondientes al segundo cuatrimestre del mismo periodo, en donde sobresale la región que corresponde a la colonia Independencia, próxima al estadio Jalisco, entre las estaciones Atemajac, Centro y Oblatos, con niveles altos de ozono en los meses de mayo, julio y agosto; mientras que en el mes de junio se presenta nuevamente la región observada en los meses de enero, febrero y marzo (figura 5) con probabilidad superior a 0.75.

Las regiones de riesgo observadas en cuatrimestre correspondiente a los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre se presentan en la figura 7, en donde se observan regiones de riesgo con probabilidades menores a 0.5 en toda la ZMG durante los meses de octubre y diciembre, no obstante se advierten regiones de riesgo en la zona que comprende Atemajac, Vallarta, Las Águilas, Miravalle y zona Centro. Destaca además el mes de noviembre, en donde sobresale de nuevo la región detectada en los meses de mayo, julio y agosto (figura 6).

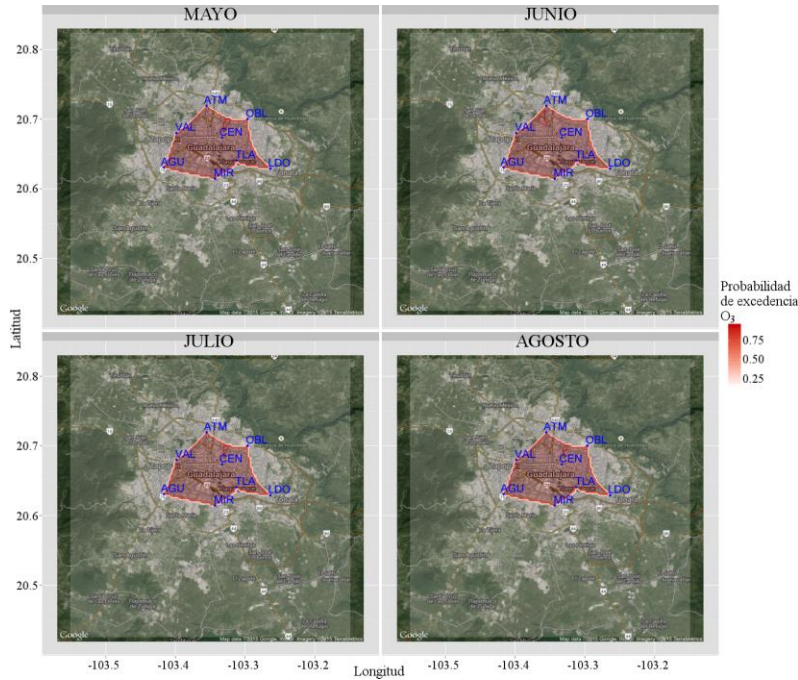


Fig. 6. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, segundo cuatrimestre del periodo 1996 – 2011.

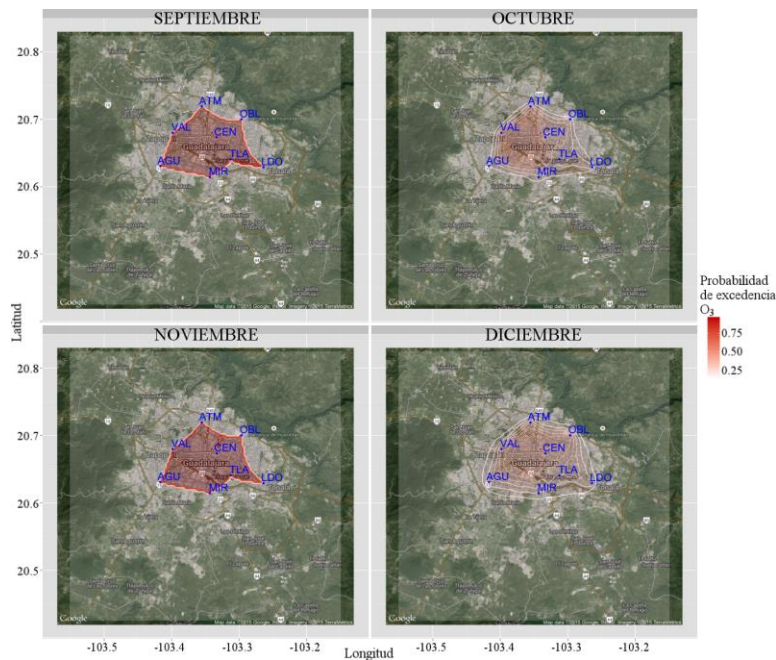


Fig. 7. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, tercer cuatrimestre del periodo 1996 – 2011.

Por otro lado, en las figuras 8, 9 y 10, se puede observar el comportamiento espacial de las regiones de riesgo para concentraciones de PM₁₀ registradas durante el primer, segundo y tercer cuatrimestre, periodo (1996 – 2011) en las ocho estaciones de la RAMA.

En las gráficas sobresale por ejemplo que, en los meses de julio, agosto (figura 9) y septiembre (figura 10), la zona de Loma Dorada presenta valores superiores a 0.6 en probabilidad regional de riesgo ambiental y en octubre (figura 10) se observa una región que se distribuye desde Miravalle hasta Loma Dorada con probabilidad mayor a 0.5.

Además, en los meses de enero hasta junio (figuras 8 y 9) y noviembre, diciembre (figura 10), el área de riesgo se localiza entre Atemajac, Vallarta, Las Águilas, Miravalle y zona Centro, alcanzando incluso la estación de Loma Dorada.

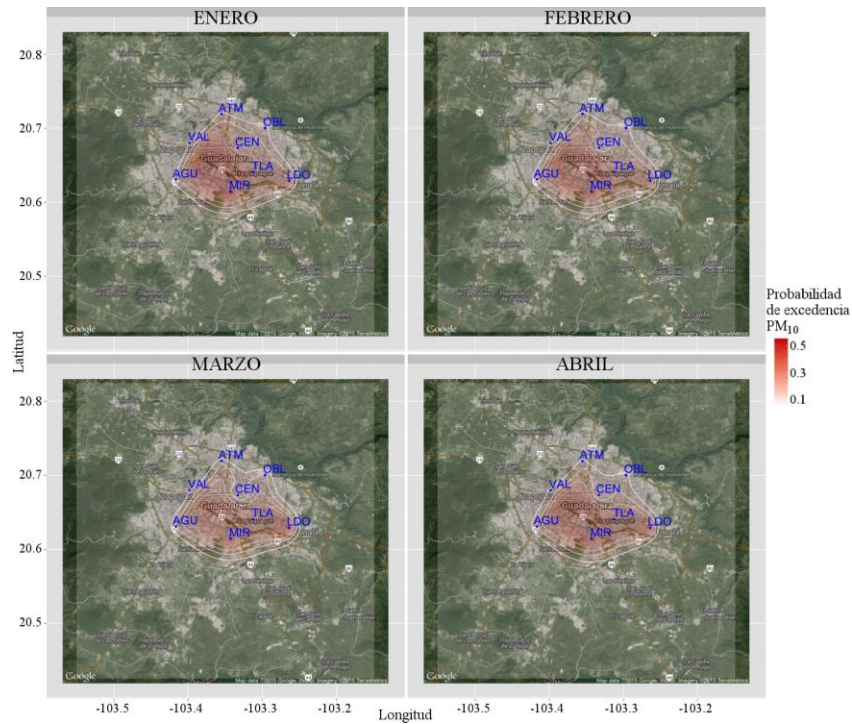


Fig. 8. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM_{10} , primer cuatrimestre del periodo 1996 – 2011.

En una observación general, ambos contaminantes muestran regiones de riesgo ambiental en la zona comprendida entre las estaciones de Atemajac, Vallarta, Las Águilas, Miravalle, zona Centro y Loma Dorada, durante el periodo 1996 – 2011 (de figura 5 a 10), observando probabilidades regionales de riesgo a exceder la norma de calidad del aire superiores a 0.5.

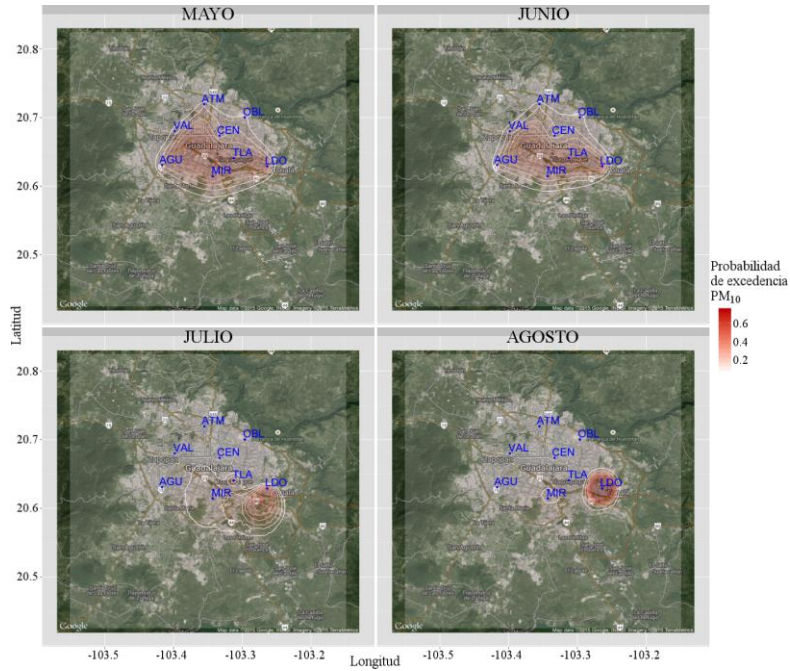


Fig. 9. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM_{10} , segundo cuatrimestre del periodo 1996 – 2011.

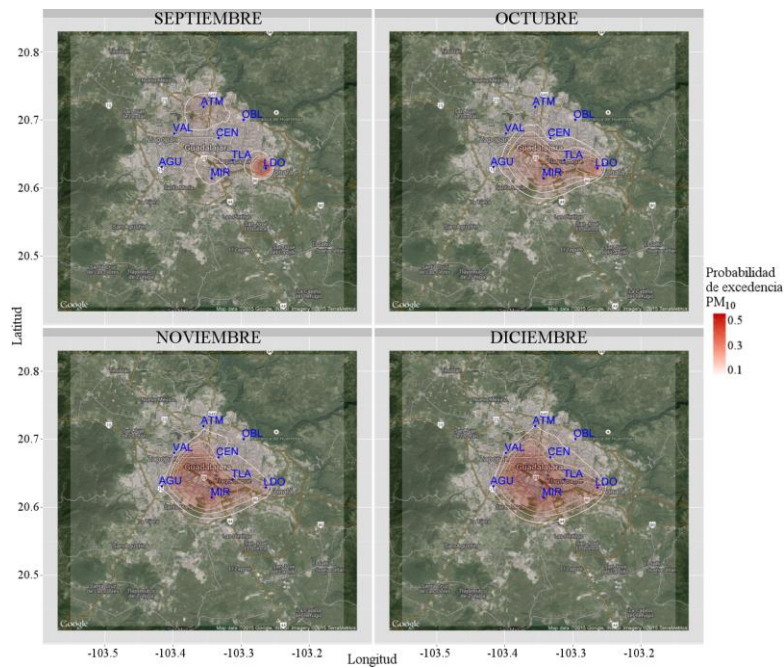


Fig. 10. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM_{10} , tercer cuatrimestre del periodo 1996 – 2011.

A. *Revisando los datos registrados en 2012*

Incorporando ahora la estación LPIN, de los datos registrados en 2012 se obtienen las gráficas de las figuras 11 a 16, en donde se pueden observar regiones de riesgo para O_3 y PM_{10} .

En la gráfica correspondiente al mes de junio (figura 12) se puede observar una región de riesgo a concentraciones altas de O_3 con probabilidad mayor a 0.75, sobre la estación Vallarta y en una zona ubicada al noreste de la estación Centro; mientras que en el mes de septiembre (figura 13), se presentó la región de riesgo con menor probabilidad en la misma localidad. Por otro lado, en la misma figura se puede observar que durante el mes de diciembre, hay una región de riesgo con probabilidad alta en la zona que se localiza entre las estaciones de Las Águilas, Miravalle y Las Pintas; misma que se extiende con menor probabilidad desde la estación Vallarta, hasta cubrir dicha región de mayor riesgo. Además, sobresale que en el mes de marzo no se observan regiones de riesgo extensas para concentraciones de ozono (figura 11).

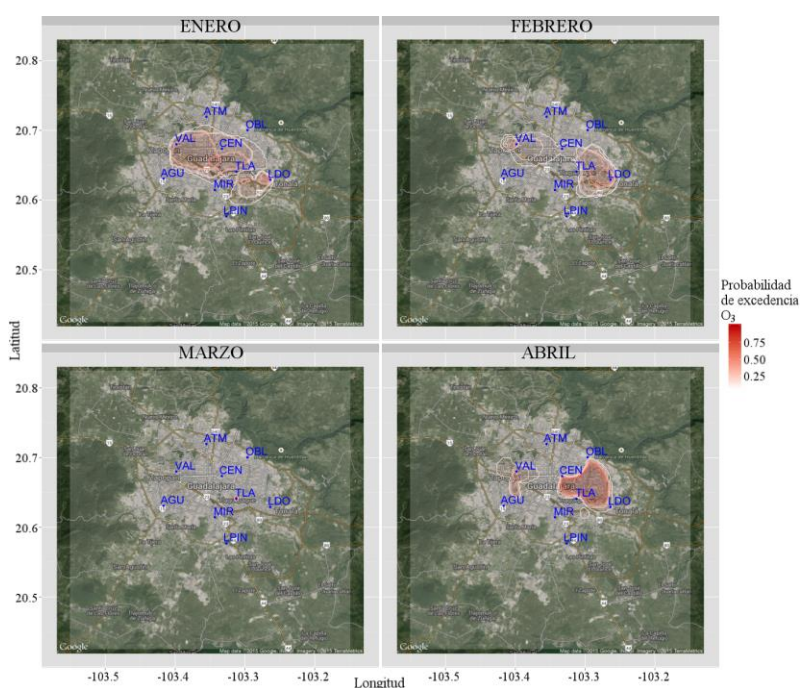


Fig. 11. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O_3 , primer cuatrimestre de 2012.

Ahora, en las gráficas de las figuras 14 a 16, se pueden observar una región de riesgo perfectamente definida entre las estaciones de Loma Dorada, Tlaquepaque, Miravalle y Las Pintas, durante todo 2012, para las concentraciones que exceden la norma para calidad del aire en las PM_{10} registradas en la zona de estudio. Sobresale por ejemplo el mes de septiembre (figura 16) con probabilidad mayor que 0.65 de exceder la norma de calidad del aire, mientras que se ven valores menores a 0.6 en los meses de enero, agosto, noviembre y diciembre; y probabilidades menores a 0.2 durante todo el año, en la zona como Oblatos.

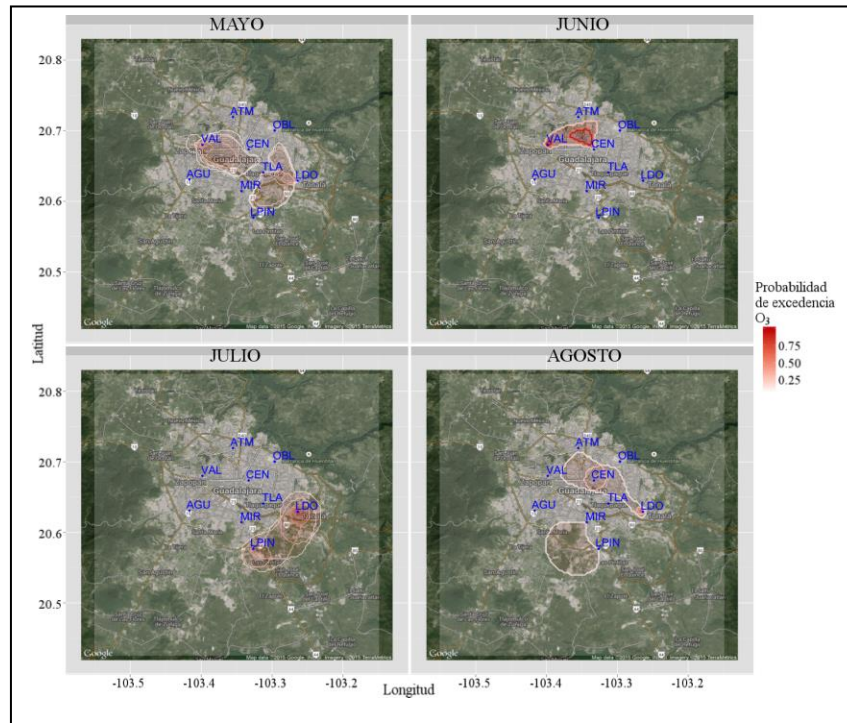


Fig. 12. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, segundo cuatrimestre de 2012.

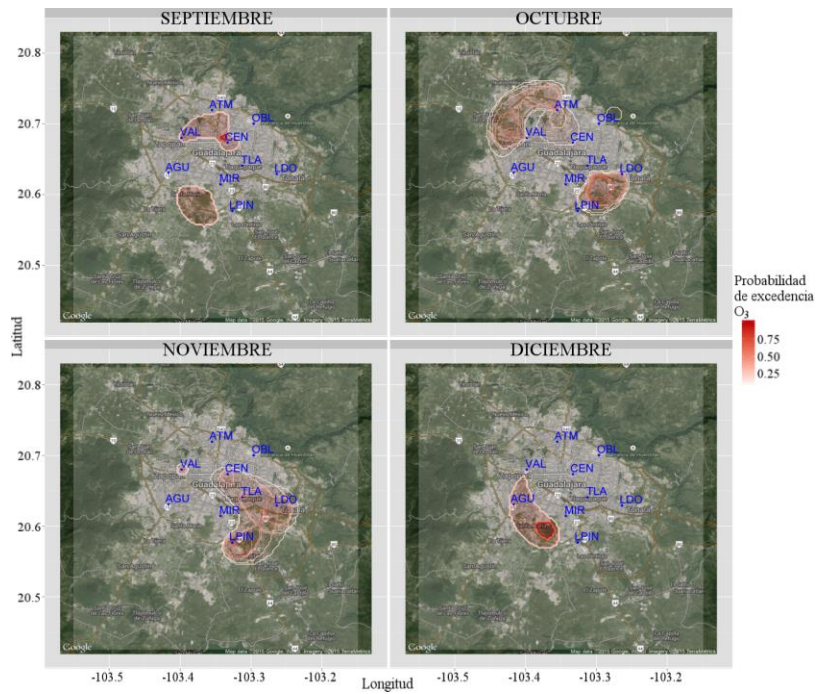


Fig. 13. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, tercer cuatrimestre de 2012.

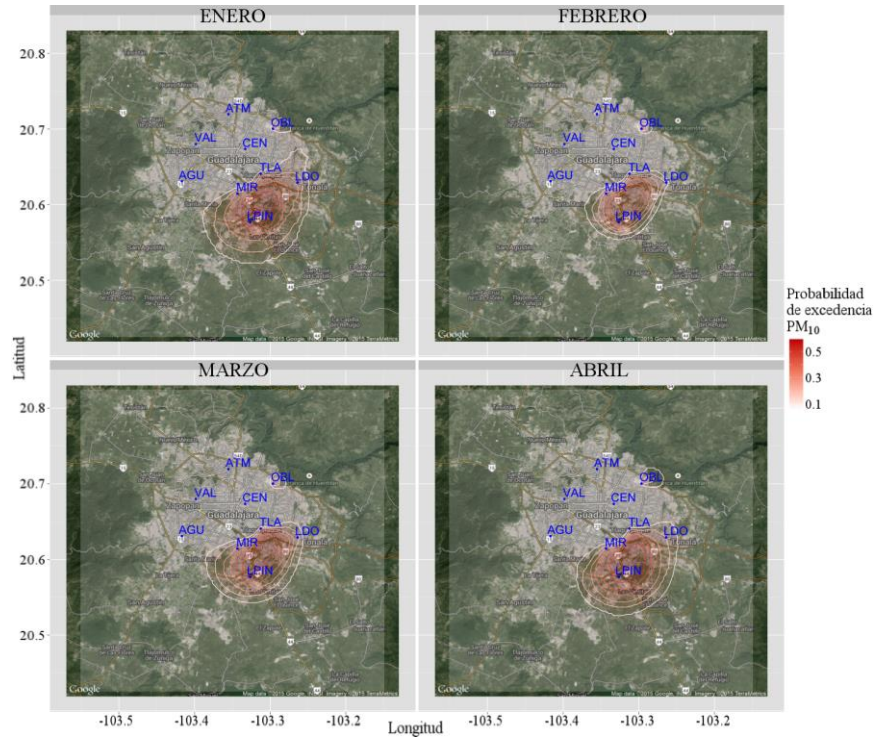


Fig. 14. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM_{10} , primer cuatrimestre de 2012.

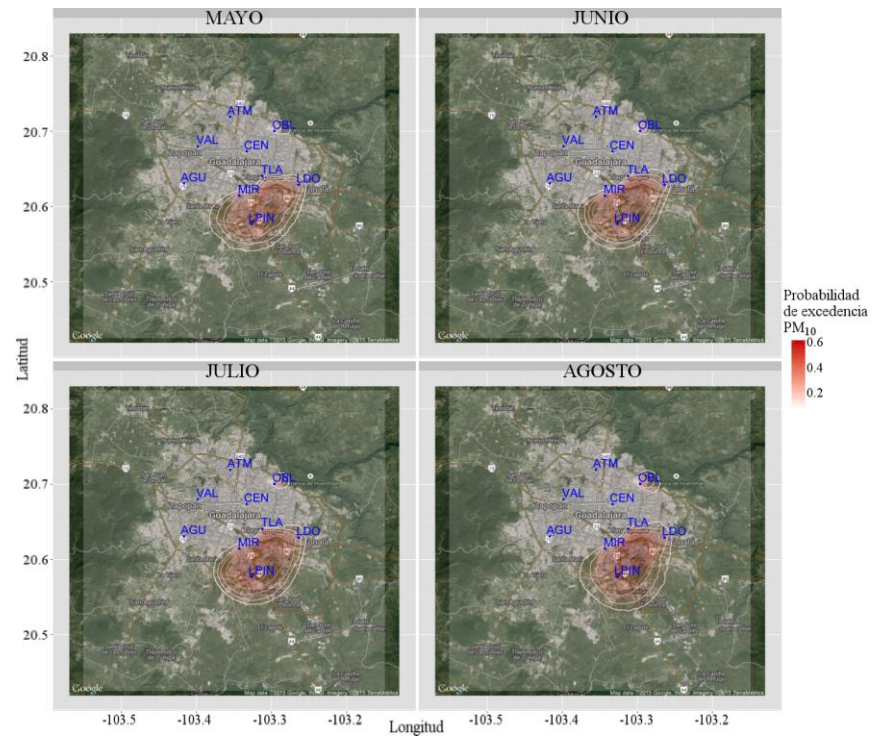


Fig. 15. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM_{10} , segundo cuatrimestre de 2012.

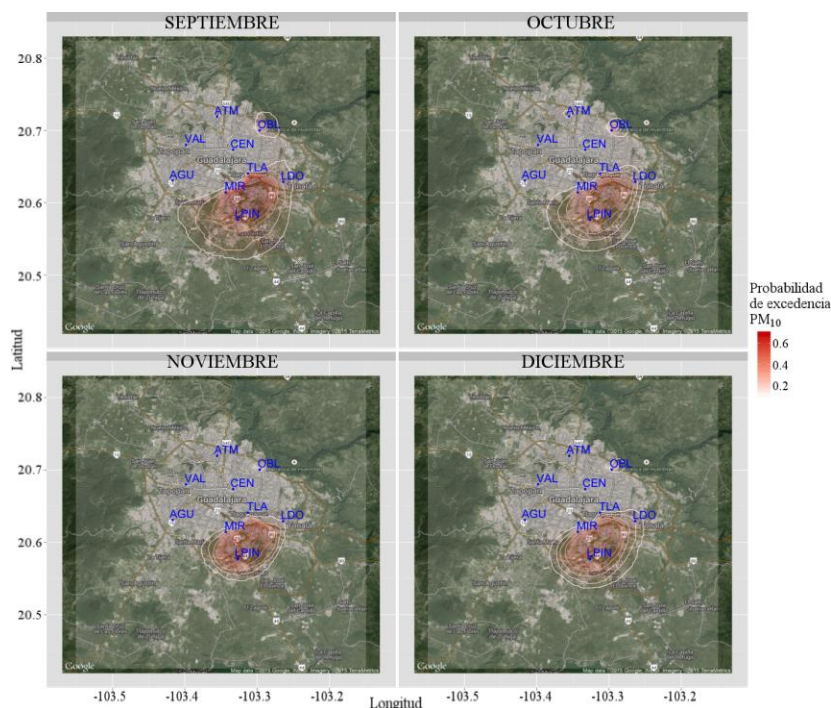


Fig. 16. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM_{10} , tercer cuatrimestre de 2012.

Al comparar las regiones observadas en las gráficas de las figuras 11 a 16, destaca fundamentalmente la gran diferencia en el comportamiento espacial del O_3 en comparación con las PM_{10} , podría ser evidente en virtud de que los procesos que los generan son muy diferentes, en donde por ejemplo el O_3 es un contaminante fotoquímico secundario, cuyos precursores son los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles y la radiación ultra violeta, en tanto que las PM_{10} son contaminantes primarios que se vierten directamente a la atmósfera por fuentes naturales o antropogénicas. Sin embargo, esto es una simple hipótesis que debe revisarse en estudios posteriores. No obstante, se debe mencionar que las condiciones geográficas y atmosféricas fueron idénticas para ambos contaminantes, lo que sugiere que éstas repercuten en menor medida y la diferencia se pueda atribuir a los procesos individuales que los generan.

Sobresale además la fuerte diferencia en el comportamiento espacial de ambos contaminantes durante el periodo 1996 – 2011 y lo observado en 2012, lo que sugiere la necesidad de estimar la región de riesgo ambiental en forma periódica, inclusive diariamente, para proporcionar una herramienta útil a quienes toman decisiones e informan a la sociedad.

B. Revisando los datos registrados en 2013

Agregando las observaciones de la estación Santa Fe, en las gráficas de las figuras 17 a 21 se pueden observar las regiones de riesgo ambiental de los registros del 2013, para las concentraciones de O_3 (figuras 17 a 19) y PM_{10} (figuras 20 y 21), en donde sobresale que durante los meses de Septiembre, Noviembre y Diciembre no se presentaron excedencias a la norma de calidad del aire en concentraciones de O_3 , mientras que durante abril, junio, septiembre y octubre, tampoco se excedió la norma de calidad del aire para las PM_{10} .

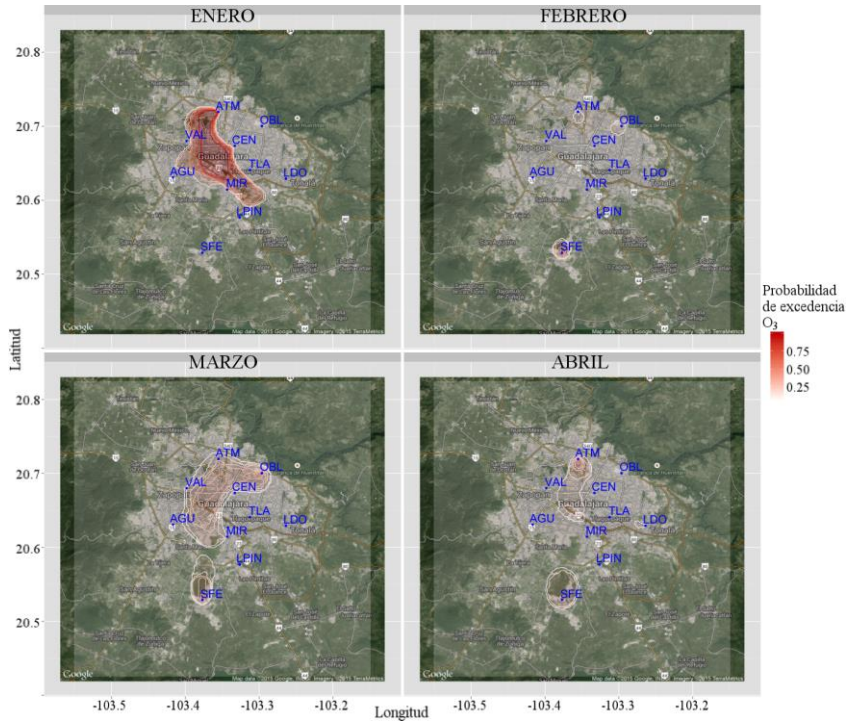


Fig. 17. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, primer cuatrimestre de 2013.

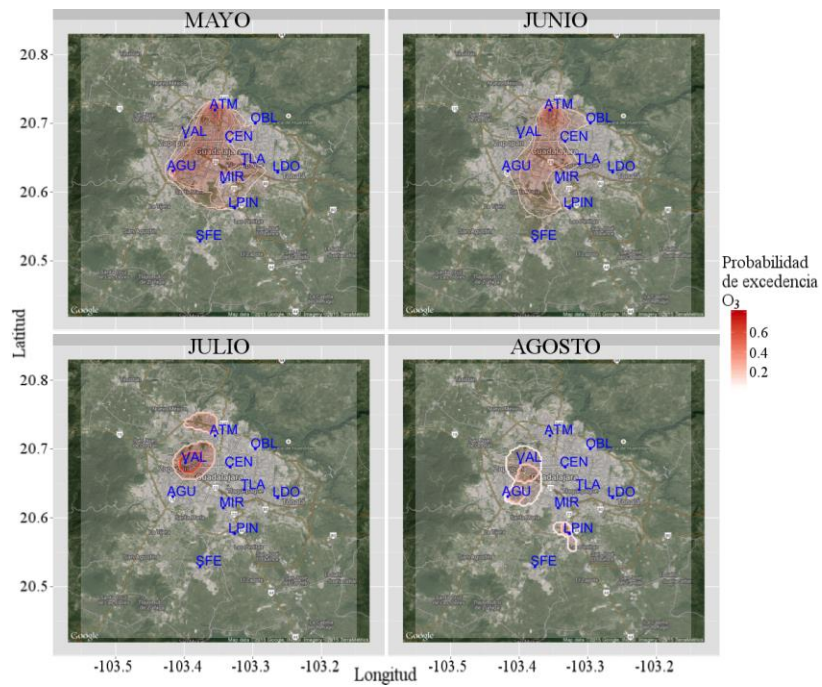


Fig. 18. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, segundo cuatrimestre de 2013.

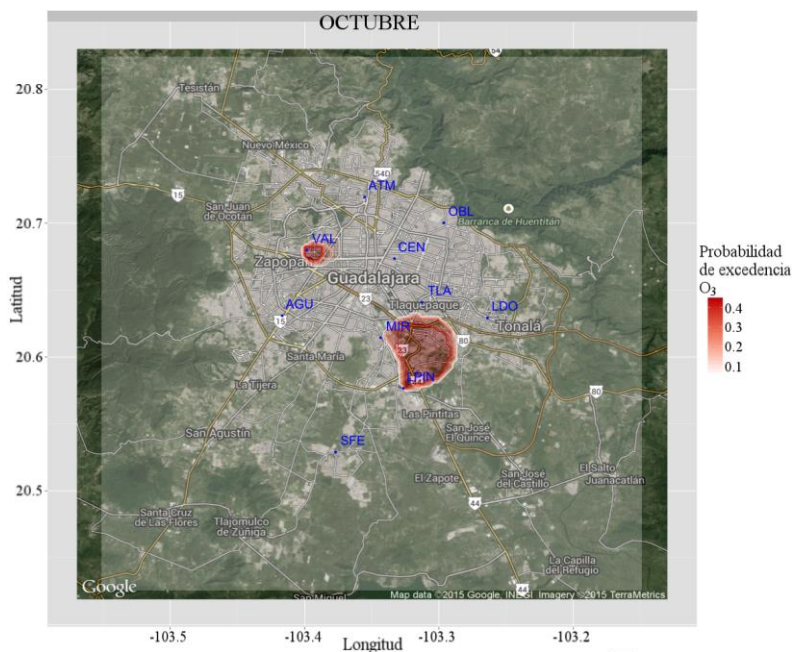


Fig. 19. Probabilidad regional de riesgo ambiental para O₃, octubre de 2013.

En las gráficas de las figuras 17 se puede observar que durante enero del 2013 se presentaron los valores de probabilidad más altos del año para la región de riesgo ambiental en concentraciones de O₃ (superior a 0.75) en la zona ubicada entre las estaciones de Atemajac, Vallarta, Centro, Las Águilas, Miravalle y extendiéndose hasta Las Pintas con probabilidad de riesgo menor a 0.25, seguido con valores de probabilidad baja (menores a 0.25) en los meses de febrero, marzo y abril del mismo año; además, la zona correspondiente a la estación Santa Fe (Tlajomulco de Zúñiga) también muestra probabilidades de riesgo ambiental y por otro lado, en la figura 18 se puede ver que la estación Vallarta muestra valores de probabilidad mayores a 0.5 para exceder la norma de calidad del aire por O₃ en el mes de julio. Destacando que en el tercer cuatrimestre no se excedió la norma de calidad del aire por O₃ en los meses de septiembre, noviembre y diciembre (figura 19), en tanto que durante octubre la probabilidad de exceder la norma supera el 0.4.

Por otro lado, en las gráficas de las figuras 19 y 20, se pueden observar las regiones de riesgo ambiental para concentraciones de PM₁₀, destacando por ejemplo que durante los meses de enero, febrero, marzo y mayo, se observan comportamientos similares al de los registros del año 2012 (figuras 14, 15 y 16), concentrándose sobre la zona correspondiente a la estación de las Pintas, destacando el mes de marzo con probabilidad de riesgo ambiental superior a 0.75 bajo condiciones que favorecen niveles altos de concentración de contaminantes en el aire. Además, se puede observar que la región de riesgo se extiende hacia la zona Centro de la ZMG durante los meses de mayo y diciembre, abarcando la estación de Miravalle, al sur suroeste de la ciudad, y cubriendo la región comprendida entre las estaciones de Oblatos, Centro, Tlaquepaque y Loma Dorada, en la parte sur sureste de la ciudad; en tanto que, durante los meses de julio y agosto la región de riesgo se concentra sobre la estación de Santa Fe, en el área de Tlajomulco de Zúñiga.

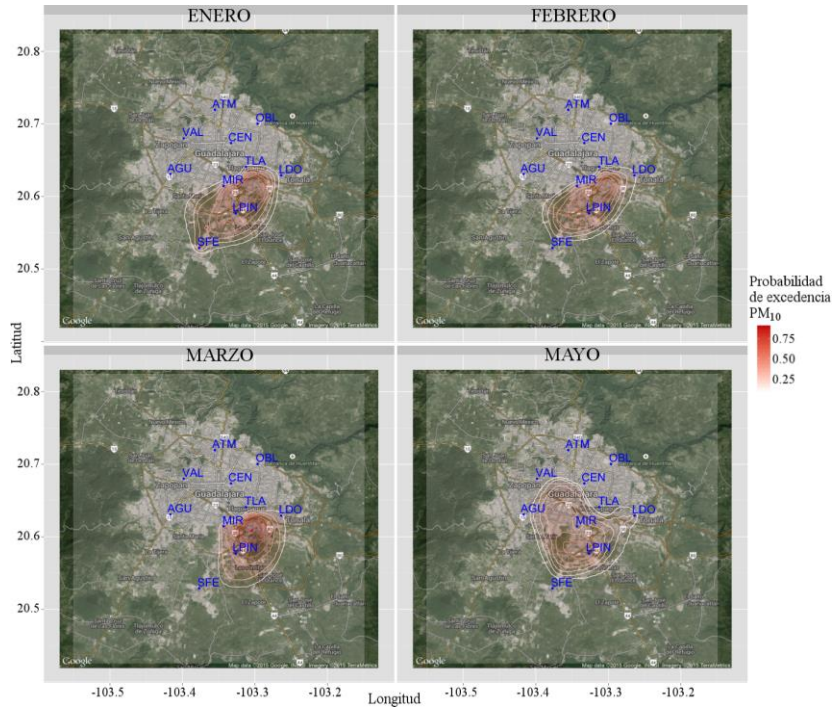


Fig. 20. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM₁₀, meses de enero, febrero, marzo, mayo de 2013.

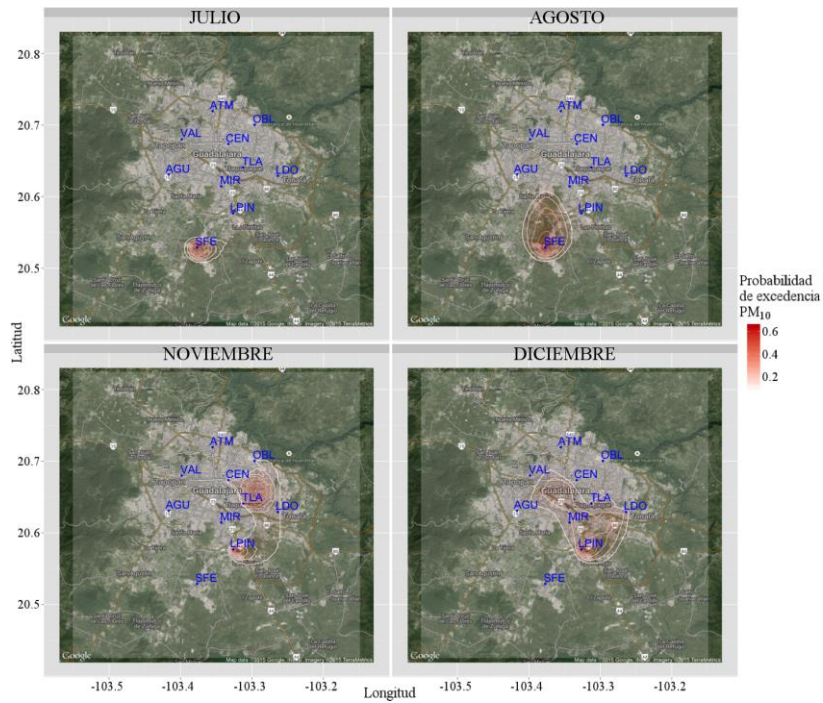


Fig. 21. Probabilidad regional de riesgo ambiental para PM₁₀, meses de julio, agosto, noviembre, diciembre de 2013.

Destaca nuevamente una marcada diferencia en el comportamiento espacial de los datos registrados durante el periodo 1996 – 2011 y lo correspondiente a 2013, sobresaliendo cierta similitud en el comportamiento espacial de los registros de 2012 y 2013.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este estudio se detectan regiones de riesgo ambiental por niveles altos en la concentración de los contaminantes (O_3 y PM_{10}) que exceden con más frecuencia la norma de calidad del aire en la ZMG.

El riesgo potencial en el que está expuesta la población por niveles altos de contaminantes del aire que respira, no ha tenido la debida atención en ciudades grandes como la ZMG; más aún, este estudio muestra que las regiones de riesgo ambiental sobrepasan el entorno próximo a las estaciones de monitoreo, detectando zonas que cubren incluso un gran porcentaje de la ciudad.

Se aplicó el método de interpolación espacial kriging, encontrando zonas de riesgo bien definidas, que exhiben una fuerte variación mensual en ambos contaminantes y entre los contaminantes analizados. Además, no se observa una constante en el comportamiento espacial de los contaminantes, por lo que se ve la necesidad de implementar una metodología que genere pronósticos para regiones de riesgo ambiental, lo que sugiere una estimación en tiempo real para mantener protegida a la población ante niveles de concentración de contaminantes que sobrepasan las normas de calidad del aire.

Se encontró que la región centro de la ZMG presenta valores altos de riesgo a concentraciones elevadas de PM_{10} en el periodo 01/01/1996 – 31/12/2011 y que en los años 2012 – 2013 la región de riesgo se ubica en la parte sur de la ZMG. Sobresaliendo que en 2013 la estación de Santa Fe muestra valores mayores a cero en términos de riesgo ambiental, lo que hace suponer que las condiciones atmosféricas (como dirección, intensidad del viento e inversión térmica) pueden favorecer el traslado de los contaminantes a dicha zona, ésta posibilidad apertura nuevas líneas de estudio.

En el caso del ozono, se detectaron regiones bien definidas en el periodo 01/01/1996 – 31/12/2011, sin embargo el mismo análisis para 2012 y 2013 muestra un comportamiento diferente, es decir, se refuerza la alta variabilidad espacio – temporal en las regiones de riesgo ambiental de la zona.

No hay evidencia para creer que las condiciones atmosféricas y geográficas de la zona sean contundentes para las regiones de riesgo ambiental. Los datos hacen suponer que dichas regiones de riesgo dependen más de los procesos químicos que incrementan la concentración de cada uno de los contaminantes atmosféricos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren expresar su reconocimiento al apoyo brindado por el personal de la Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial cuyas bases de datos son el sustento del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] D.E. Abbey, N. Nishino, W.F. McDonnell, R.J. Burchette, S.F. Knutsen, W. Lawrence Beeson, J.X. Yang, J. Ame, "Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers," *Respir. Crit. Care Med.* 1999, 159(2), pp. 373-82.
- [2] CONAPO (2014) Consejo Nacional de la Población, "La distribución territorial de la población en México". Recuperado el 07 de noviembre de 2014, de <http://www.conapo.gob.mx/>.
- [3] N. Cressie, D.M. Hawkins (1980) "Robust Estimation of the Variogram: I", *Mathematical Geology*, Vol. 12, No. 2, pp. 115-125.

- [4] GEJ/SEMARNAP/SS (1997) Gobierno del Estado de Jalisco, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría Salud, "Programa para mejoramiento la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001,".
- [5] Iain M. Carey, Richard W. Atkinson, Andrew J. Kent, Tjeerd van Staa, Derek G. Cook, and H. Ross Anderson (2013) "Mortality Associations with Long-Term Exposure to Outdoor Air Pollution in a National English Cohort," *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 187(11), pp. 1226-1233.
- [6] E. Jauregui, L. Godinez, F. Cruz (1992) "Aspects of the island in Guadalajara, Mexico," *Atmospheric Environment*, 26B(3), pp. 391-396.
- [7] Leticia Hernández-Cadena, Albino Barraza-Villarreal, Matiana Ramírez-Aguilar, Hortensia Moreno Macías, Paul Miller, Luz Carbajal, Isabelle Romieu (2007) "Morbilidad infantil por causas respiratorias y su relación con la contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua, México," *Salud pública de México*, 49(1), pp. 27-36.
- [8] Murray M. Finkelstein, Michael Jerrett and Malcolm R. Sears (2004) "Traffic Air Pollution and Mortality Rate Advancement Periods," *Am. J. Epidemiol.*, 160(2) 173-177.
- [9] M. C. Nájera Cedillo (2005) "Análisis de Ozono de Troposfera baja registrado en la Zona Metropolitana de Guadalajara", Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara.
- [10] B. Ostro, "A search for a threshold in the relationship of air pollution to mortality: a re-analysis of data on London winters," *Environ. Health Perspect.*, 1984, 58, pp. 397-399.
- [11] C.A. Pope, D.V. Bates and M.F. Raizenne, "Health effects of particulate air pollution: Time for reassessment?," *Environ. Health Perspect.*, 1995a 103, 472-480.
- [12] C.A. Pope, M.J. Thun, M.M. Namboodiri, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.E. Speizer and C.W. Heath, "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults," *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1995b 151, 669-674.
- [13] R. Sánchez Gómez, H.H. Calderón Flores, R. Fregoso Vázquez, E. Brito Muñoz, M.L. Rujano Silva y S. Sánchez Díaz (2010) "Análisis y estimación de datos perdidos en investigación aplicada", Editorial Universidad de Guadalajara, pp. 196.
- [14] C. Sarrat, A. Lemonsu, V. Masson, D. Guedalia (2006) "Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution." *Atmos. Environment*, Elsevier, 40, pp. 1743-1758.
- [15] SEDESOL/CONAPO/INEGI (2007) Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 2005, "Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005". Recuperado el 02 de diciembre de 2014, de http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/delimex_05/DZMM_2005_0.pdf.
- [16] SEMADET (2013) Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, "Sitio de Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco", Recuperado el 10 de octubre de 2014, en <http://semadet.jalisco.gob.mx/medio-ambiente/calidad-del-aire/sitio-de-sistema-de-monitoreo-atmosferico-de-jalisco>.
- [17] SIMAJ/SEMADET (2014) Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, Recuperado el 20 de mayo de 2014, en <http://siga.jalisco.gob.mx/aire/Datos.html>.
- [18] R.L. Smith, J.M. Davis, J. Sacks, P. Speckman and P. Styer (2000) "Regression models for air pollution and daily mortality: analysis of data from Birmingham, Alabama," *Environmetrics*, 11, 719-743.
- [19] SSA(2005) Secretaría de Salud, "MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993", Recuperado el 20 de mayo de 2014, en <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/025ssa193.html>.
- [20] Tamara Schikowski, Inga C. Mills, H. Ross Anderson, Aaron Cohen, Anna Hansell, Francine Kauffmann, Ursula Krämer, Alessandro Marcon, Laura Perez1, Jordi Sunyer12, Nicole Probst-Hensch and Nino Künzli (2014) "Ambient air pollution: a cause of COPD?," *European Respiratory Journal* 43(1) pp. 250-263.
- [21] I.E. Tereshchenko, R. Sánchez Gómez (1996) "Acerca de la estructura vertical de la atmósfera sobre la Zona Metropolitana de Guadalajara," *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Boletín Informativo, época II, volumen 16 No. 4* Noviembre de 1996, p.176.

- [22] ----- (1997) "Resultados de los estudios de las inversiones térmicas sobre la ciudad de Guadalajara, Mexico," GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Boletín Informativo, 17(4), pp. 195-196.
- [23] Thad Godish (2004) "Air Quality," 4th Edition. Lewis Publishers.