

Artículo Científico

Evaluación de la contaminación del aire por la quema del diablo

Christian Edgardo Saravia Solares

Ambente, S.A.

Dirección para recibir correspondencia: saraviachristian@gmail.com

Recibido: 10.03.2020 Aprobado: 24.07.2020

Resumen

La quema del diablo se celebra cada año el 7 de diciembre a las 18:00 horas en Guatemala, tradición que en hacer fogatas en la calle. La contaminación del aire en la ciudad de Guatemala se ha evaluado cualitativamente o basado en estimaciones, por lo que es necesario cuantificar la contaminación del aire cuando se presenta el evento. Se instalaron sensores que miden las partículas con diámetro aerodinámico de 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) y 10 micrómetros (PM_{10}). La medición se inició a las 00:00 y se concluyó a las 24 horas. El rango para $PM_{2.5}$ con valores promedio se encuentra entre 15 a $8 \mu g m^{-3}$ y máximo de $152 \mu g m^{-3}$ y para PM_{10} promedio 26 a $14 \mu g m^{-3}$ y máximo de $267 \mu g m^{-3}$. Los resultados indican que en el periodo entre las 18:00 a las 21:30 horas, se incrementaron los niveles de partículas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , a partir de las 22:40 horas, se tuvo picos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} debido probablemente a la contaminación arrastrada de los vientos predominantes del noreste y estenordeste, con promedios que superan los límites permitidos de las guías de la Organización Mundial de la Salud del 2005, para material particulado $PM_{2.5}$ $25 \mu g m^{-3}$ y PM_{10} $50 \mu g m^{-3}$.

Palabras clave: Calidad del aire, quema del diablo, material particulado, PM_{10} , $PM_{2.5}$, salud.

Abstract

The burning of the devil held every year on December 7th at 18:00 hours is a Guatemalan tradition, which consists to make bonfires on the street. The air pollution in Guatemala City by this has only been qualitatively evaluated or based on emissions estimations, so it is necessary to quantify the pollution of air when the event is presented. Air quality sensors that measure the particle size with an aerodynamic diameter of 2.5 micrometers ($PM_{2.5}$) and 10 micrometers (PM_{10}) were installed, the measurement increased at 00:00 and it was completed after 24 hours. The range for $PM_{2.5}$ with average values is between 15 to $8 \mu g m^{-3}$ and a maximum of $152 \mu g m^{-3}$ and for PM_{10} averages 26 to $14 \mu g m^{-3}$ and a maximum of $267 \mu g m^{-3}$. The results indicated in the period between 18:00 and 21:30, increased the levels of $PM_{2.5}$ and PM_{10} particles, from 22:40, it had peaks of the $PM_{2.5}$ and PM_{10} due to the pollution carried by the prevailing winds from the northeast and east-northeast, with averages that exceed the limits allowed by the guidelines of the World Health Organization from 2005, for $PM_{2.5}$ particulate matter $25 \mu g m^{-3}$ and PM_{10} $50 \mu g m^{-3}$.

Key words: Air quality, burning the devil; particulate matter, PM_{10} , $PM_{2.5}$, health.

Introducción

Los contaminantes atmosféricos más relevantes son el material particulado, que es un parámetro representativo de salud y contaminación del aire (OMS, 2005). Para registrar el comportamiento de la calidad del aire se instalaron tres sensores que midieron los parámetros de material particulado de tamaño de 2.5 y 10 micrómetros de diámetro, en la Ciudad de Guatemala durante la quema del diablo en el año 2018. Producto de ello se obtuvieron datos cada

3 minutos durante un tiempo de 24 horas y también se registraron datos meteorológicos como velocidad y dirección del viento.

Se realizó un estudio estadístico de los datos obteniendo promedios aritméticos, desviación estándar, mínimos, máximos, distribución de frecuencias y percentiles, los resultados se compararon con las guías de calidad del aire para material particulado de la Organización Mundial de la Salud OMS. Debido a la gran dispersión de los

valores obtenidos, se realizó una segmentación del tiempo para hacer un análisis antes, durante y después de la quema del diablo. Los registros mostraron que los niveles de calidad del aire se mantuvieron bajos y constantes antes de las 18:00 horas, la ubicación Trébol presentó los mayores niveles de contaminación del aire para $PM_{2.5}$ y PM_{10} . En el transcurso de las 18:00 horas hasta la media noche se obtuvieron datos de niveles altos atípicos que excedieron los límites aceptables de las guías de la OMS, siendo la ubicación Bolívar la que presentó mayores niveles de contaminación del aire para $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

Los vientos que predominaron la mayor parte del tiempo fueron del estenordeste. Para conocer el desplazamiento de las partículas se realizó una modelación de trayectorias por velocidades verticales del material particulado a una altura cercana al suelo, donde posiblemente se vio afectado debido al arrastre de la contaminación del aire el suroeste del área metropolitana.

Antecedentes

La quema del diablo cada 7 de diciembre a las 18:00 horas, es una tradición guatemalteca y tiene mucho significado para la población, donde se hacen fogatas para purificar, en las vísperas del día de la Virgen de Concepción, a las seis de la tarde en la puerta de la casa se saca la basura para quemarla (Lara, 1975), la tradición se ha modificado por que anteriormente se hacía en la calle frente a cada casa quemando arbustos y viruta (Lara, 1975), las molestias por el humo hizo conciencia, pero hasta ahora no han sido objeto de cuantificación.

Si bien las autoridades han indicado que la quema del diablo es un evento contaminante y han hecho campañas de concienciación para que se evite o no se quemé basura y material tóxico, con lo cual se ha reducido las casas que mantienen la tradición y ahora se prefiere quemar piñatas en forma de diablo, acompañado por la quema de cohetes. No existen datos que cuantifiquen la concentración de los contaminantes, lo único que existe es una estimación sin datos ciertos “se incrementa el monóxido de carbono. Según el estudio, se estima que se realizan más de 500 mil fogarones lo que equivale al humo de 1.5 millones de vehículos, influyendo

directamente en el cambio climático” (radioinfinita, 2018).

Según la OMS, el material particulado es un parámetro representativo de la contaminación del aire, que afecta a más personas que cualquier otro contaminante y consiste en una compleja mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire (OMS, 2018). Las partículas objeto de investigación fueron las de diámetro aerodinámico de menores de 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) y 10 micrómetros (PM_{10}), que se relacionan con ingresos a hospitales y síntomas respiratorios (Bell & Samet, 2010), las primeras pueden penetrar y alojarse en lo profundo de los pulmones y las segundas son más dañinas pues pueden atravesar la barrera pulmonar y llegar al torrente sanguíneo (OMS, 2018) y al disminuir el tamaño de la partícula se aumenta su toxicidad, (Rosales-Castillo, Torres-Mesa, Olaiz Fernández, Borja -Aburto, 2001).

Las condiciones meteorológicas como velocidad y dirección del viento influyen en la contaminación atmosférica (Parveen Sevusu, 2015). La velocidad y dirección del viento son importes en el transporte y dispersión de las partículas (Pérez-Vidal, H., Luna Gomez-Rocha, MA., Acosta-Pérez, Ll., 2010).

La actualización de las guías de calidad del aire en 2005 (OMS, 2006) para material particulado, proponiendo valores de exposiciones de corta duración que se refiere a concentración media de 24 horas, ver Tabla 1.

Tabla 1. Guías de OMS 2005

Parámetros	Concentraciones	Comentarios
PM_{10}	50 $\mu\text{g m}^{-3}$	Media de 24 horas
$PM_{2.5}$	25 $\mu\text{g m}^{-3}$	Media de 24 horas

Fuente: Guías de la OMS para de material particulado, 2005

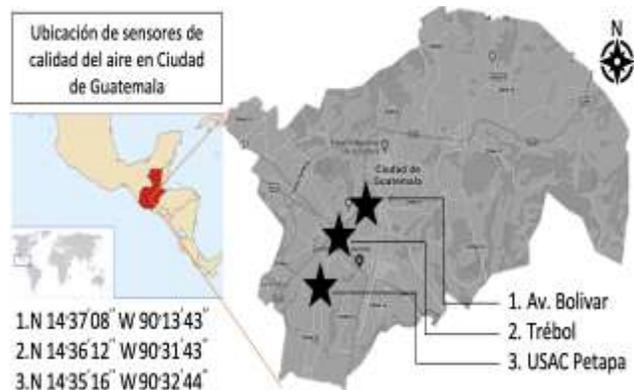
Metodología

Se instalaron tres sensores de bajo costo de calidad del aire de medición óptica en tiempo real de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , programados para enviar 40 datos hora por sensor aproximadamente, información transmitida

cada 2.5 a 3 minutos, con lo que se cuenta con la información de calidad del aire del día siete de diciembre de 2018. La información de meteorología se obtuvo de una estación meteorológica marca Davids, Vantage Pro2, registrando velocidad y dirección del viento, temperatura ambiental, humedad relativa y presión atmosférica.

Según se muestra en la Figura 1, los puntos de muestreo y su localización se describen a continuación: Bolívar, inmediaciones de avenida Bolívar y 32 calle A, zona 3; Trébol, en la estación de Bomberos del Boulevard Liberación, zona 12 y Universidad de San Carlos (USAC) en avenida Petapa zona 12.

Figura 1. Localización de los puntos de muestreo en Ciudad de Guatemala



Las ubicaciones de los equipos tienen características de encontrarse sobre vías de alto tráfico, áreas mixtas de residencia y comercio e industria, como barrios populares y poblados antes de los años cuarenta del siglo XX. Las estaciones o punto de muestreo, Tabla 2, transmitieron datos para cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 2. Estaciones o punto de muestreo

Punto de muestreo	Localizaciones	inicio del muestreo	Fin del muestreo	No de datos
Bolívar	N 14° 37' 08" W 90° 13' 43"	00:00:01	23:57:00	470
Trébol	N 14° 36' 12" W 90° 31' 43"	00:01:00	23:58:00	537

Punto de muestreo	Localizaciones	inicio del muestreo	Fin del muestreo	No de datos
USAC	N 14° 35' 16" W 90° 32' 44"	00:01:00	23:58:00	575

Se realizó un estudio estadístico de todos los puntos de muestreo de los lugares mencionados de los datos registrados, obteniéndose el promedio aritmético, desviación estándar, valores mínimos, máximos, distribución de frecuencias y percentiles. También se tomó en cuenta los datos meteorológicos para relacionarlos con frecuencias de los valores de material particulado en el ambiente con la distribución de la velocidad y dirección del viento.

Resultados

El análisis del evento del siete de diciembre de 2018, se segmentó en tres grupos, datos registrados de 00:00 a 23:59, de 00:00 a las 18:00 y 18:00 horas en adelante, este último coincidió con el inicio de la quema del diablo. La Tabla 3 y Figura 2, presentan los datos estadísticos de PM₁₀ y PM_{2.5} de 00:00 a 23:59 horas, en la Tabla 4 se muestra el análisis de datos de 00:00 a 18:00 horas y en la Tabla 5 se presentan los resultados registrados durante el evento de la quema del diablo, datos que superan los límites permitidos de calidad del aire para material particulado de la OMS, datos que se obtienen alrededor de las 18:00 horas y que concluyen cuando las inmisiones bajan las concentraciones a valores que no superan los límites permitidos de la OMS, en las Figuras 2 y 3 se presentan el comportamiento de los parámetros PM_{2.5} y PM₁₀ durante el periodo de la quema del diablo para las tres ubicaciones, así como la distribución de frecuencias y el análisis de percentiles ver Tabla 6.

Tabla 3. Datos estadísticos de 00:00 a 23:59 horas del día siete de diciembre

Puntos de muestreo	Promedios µg m-3	Desviación estándar µg m-3	Mínimos µg m-3	Máximos µg m-3
Bolívar				
PM ₁₀	22	28.52	2	267
PM _{2.5}	13	15.77	2	152
Trébol				

Puntos de muestreo	Promedios $\mu\text{g m}^{-3}$	Desviación estándar $\mu\text{g m}^{-3}$	Mínimos $\mu\text{g m}^{-3}$	Máximos $\mu\text{g m}^{-3}$
PM ₁₀	26	24	6	216
PM _{2.5}	15	17	3	148
USAC				
PM ₁₀	14	9	3	75
PM _{2.5}	8	6	2	35

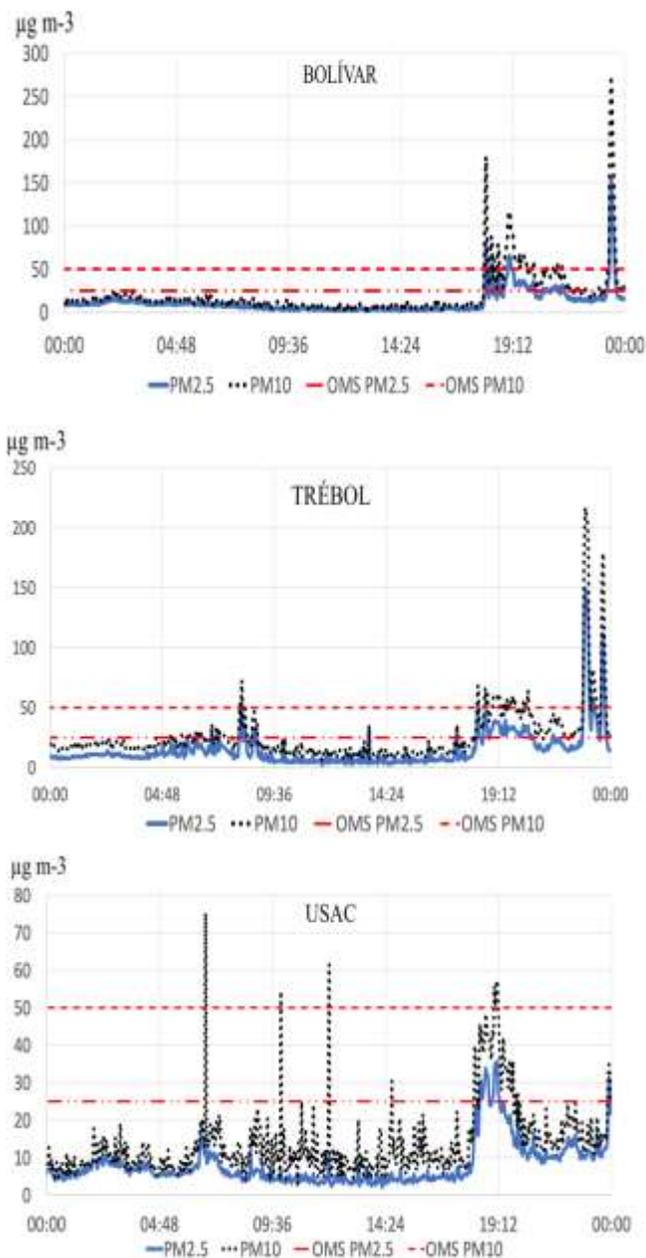
En la Figura 2, se muestran los comportamientos en el tiempo de las partículas, para los diferentes puntos de muestreo, es notable cuando se incrementan los niveles de concentración de la contaminación por partículas en el ambiente, en el transcurso de las 18:00 horas hasta la media noche del siete de diciembre. Los límites aceptables de las guías de la Organización Mundial de la Salud OMS se ven excedidos durante cierto tiempo durante el evento de la quema del diablo.

Para la ubicación del sensor en el punto de muestreo Bolívar, las condiciones de material particulado se mantuvieron constantes hasta las 18:00, donde se incrementan considerablemente y permaneciendo elevados hasta la media noche.

Para la ubicación del sensor en el punto de muestreo Trébol, los niveles de contaminación de material particulado, empezaron a aumentar a las 18:15 horas, se mantuvieron constantes y disminuyeron a las 21:00 horas aproximadamente, para luego volver a incrementar a las 22:00 horas.

Para la ubicación del sensor de en el punto de muestreo USAC, los niveles de contaminación fueron variados, a las 18:10 horas aumentaron y mantuvieron el mismo comportamiento que indicado en las dos gráficas anteriores en la relación al material particulado en el ambiente.

Figura 2. Gráficas del comportamiento de PM₁₀ y PM_{2.5} en diferentes ubicaciones

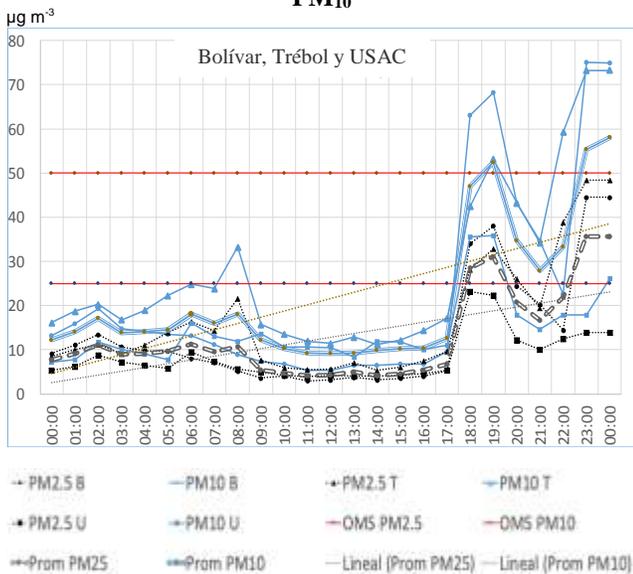


El punto de muestreo Bolívar, presenta mayor variación e incremento de las concentraciones alcanzando su máximo valor de 267 $\mu\text{g m}^{-3}$ alrededor de las 23:00 horas, el punto de muestreo que presenta una menor concentración de contaminación por material particulado es la USAC, pero demostró ser una localidad que fue afectada durante la quema del

diablo, ya que aumentó las concentraciones alrededor de las 18:10 horas.

Para proporcionar una mejor comprensión de la distribución de los datos observados y valores atípicos, en especial aquellos valores que aumentan considerablemente durante y después de las 18:00 horas. En la Figura 3, se muestra las concentraciones promedio hora para los tres puntos de muestreo: (B) Bolívar, (T) Trébol y (U) USAC. Durante la mayor parte del día 7 de diciembre, la estación que presentó mayores niveles de concentración promedio hora de material particulado antes de la quema del diablo (18:00 horas) es el punto de muestreo del Trébol, durante la actividad de la quema del diablo el punto de muestreo que presentó mayores niveles de contaminación fue la estación Bolívar.

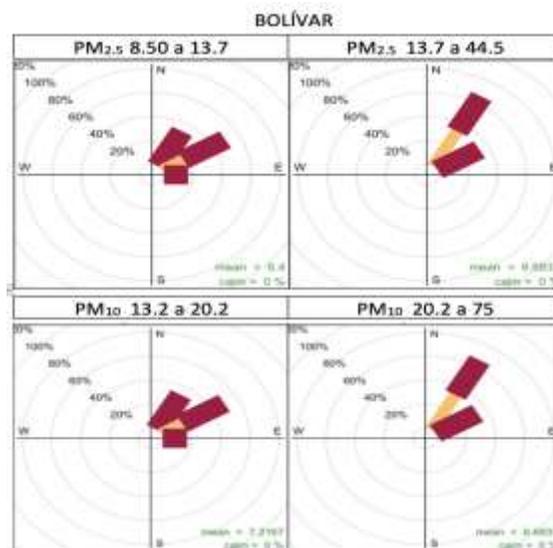
Figura 3. Concentraciones promedio hora de PM_{2.5} y PM₁₀

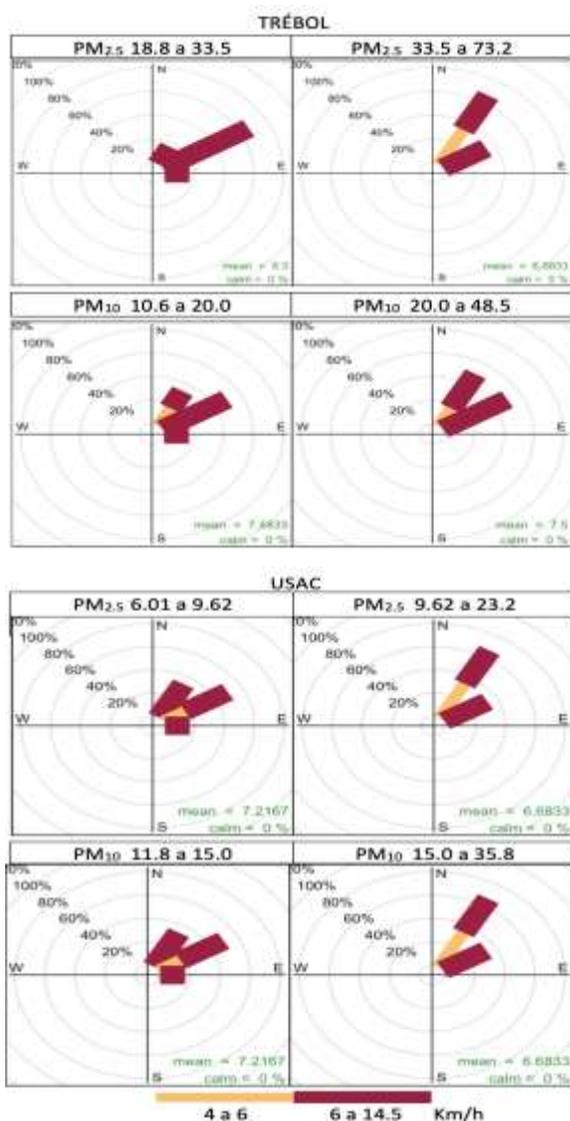


Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, la capa más interesante es la troposfera, ya que, es la región más afectada por la actividad del hombre (Hayas Barrú, 2015). Las concentraciones de material particulado en el ambiente, depende de su generación y de su dispersión en el espacio-tiempo, por lo cual el factor meteorológico juega un papel importante en especial para su distribución y

dispersión. En la Figura 4, se relaciona la frecuencia del porcentaje en la dirección y velocidad del viento con los valores de contaminación por PM_{2.5} y PM₁₀. La rosa de vientos, brinda una idea sobre las condiciones que tienden a conducir a concentraciones altas o bajas del material particulado, ya que mostraron una similitud de la tendencia entre los puntos de muestreo de Bolívar y USAC. Para concentraciones bajas de PM_{2.5} y PM₁₀ la dirección del viento tiene una frecuencia del 45% dominada por vientos del estenordeste, para concentraciones altas tienen una frecuencia del 63% dominada por vientos del nordeste. El punto de muestreo Trébol para concentraciones bajas de PM_{2.5} y PM₁₀ la dirección del viento tiene una frecuencia del 45-63% dominada por vientos del estenordeste, para concentraciones altas tienen una frecuencia del 45-63% dominada por vientos del nordeste.

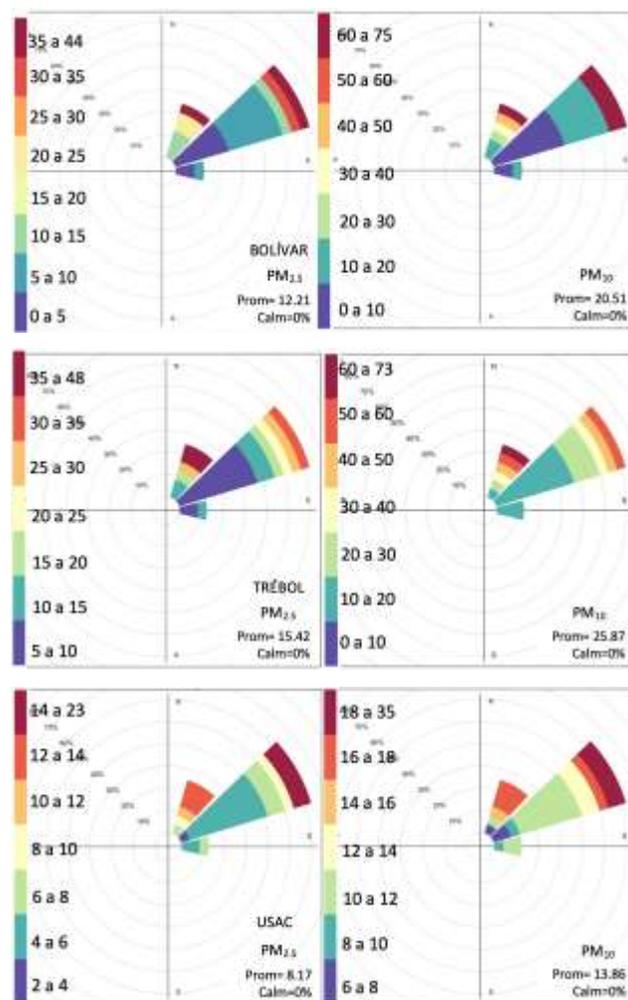
Figura 4. Rosa de los vientos por rangos de concentración del material particulado y su frecuencia en la dirección del viento





viento del estenordeste es del 63% y del noreste del 25% aportando las mayores contribuciones, mientras que el 12% apor to bajas concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀.

Figura 5. Rosa de contaminación de frecuencia de la dirección del viento con el porcentaje de concentraciones del material particulado durante un rango en particular



La rosa de contaminación como se muestra en la Figura 5, considera las concentraciones de contaminación por material particulado en el ambiente por la dirección del viento, en otras palabras muestra el porcentaje de tiempo que la concentración estuvo en un rango particular. Claramente muestra el dominio de los vientos del noreste y estenordeste que controlan las concentraciones medias de PM_{2.5} y PM₁₀ en las diferentes ubicaciones de muestreo. De hecho, casi la mitad de la concentración total de material particulado es aportada por dos sectores de viento al noreste y estenordeste. La frecuencia del conteo de dirección del

El análisis estadístico antes del evento de la quema del diablo para las tres ubicaciones indica que la estación del Trébol tiene el mayor promedio por concentración de PM_{2.5} y PM₁₀, Tabla 4.

Tabla 4. Datos estadísticos entre las 00:00 a 18:00 horas

Puntos de muestreo	Promedios $\mu\text{g m}^{-3}$	Desviación estándar $\mu\text{g m}^{-3}$	Mínimos $\mu\text{g m}^{-3}$	Máximos $\mu\text{g m}^{-3}$	Periodo de tiempo hh:mm:ss
Bolívar					
PM ₁₀	10	5	2	24	00:00:63 a 17:48:15
PM _{2.5}	7	4	2	17	
Trébol					
PM ₁₀	17	7	6	72	00:01:51 a 17:53:31
PM _{2.5}	9	6	3	54	
USAC					
PM ₁₀	11	6	3	75	00:01:29 a 17:59:50
PM _{2.5}	6	2	2	17	

Los valores promedio correspondientes al periodo de tiempo, que supero las guías de la OMS para material particulado, durante el evento de la quema del diablo se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentraciones que superaron las guías de la OMS para PM_{2.5} y PM₁₀, durante la quema del diablo

Puntos de muestreo	Promedios $\mu\text{g m}^{-3}$	Desviación Estándar $\mu\text{g m}^{-3}$	Mínimos $\mu\text{g m}^{-3}$	Máximos $\mu\text{g m}^{-3}$	Periodo de tiempo hh:mm:ss
Bolívar					
PM ₁₀	57	25	27	179	18:00:59 a 21:25:40
PM _{2.5}	31	12	16	79	

Puntos de muestreo	Promedios $\mu\text{g m}^{-3}$	Desviación Estándar $\mu\text{g m}^{-3}$	Mínimos $\mu\text{g m}^{-3}$	Máximos $\mu\text{g m}^{-3}$	Periodo de tiempo hh:mm:ss
Trébol					
PM ₁₀	51	8	31	68	18:09:45 a 20:33:02
PM _{2.5}	32	6	20	52	
USAC					
PM ₁₀	54	3	50	57	18:24:15 a 19:14:11
PM _{2.5}	29	3	24	35	

Tabla 6. Percentiles y relación con los valores criterio de la OMS para PM_{2.5} y PM₁₀, durante la quema del diablo

Puntos de muestreo	Percentiles	OMS $\mu\text{g m}^{-3}$	Periodo de tiempo hh:mm:ss
Bolívar			
PM ₁₀	46	50	18:00:59 a 21:25:40
PM _{2.5}	29	25	
Trébol			
PM ₁₀	42	50	18:09:45 a 20:33:02
PM _{2.5}	8	25	
USAC			
PM ₁₀	50	50	18:24:15 a 19:14:11
PM _{2.5}	13	25	

Es importante mencionar que a partir de las 23:16 se presentaron picos que se pueden visualizar en las gráficas del comportamiento de PM_{2.5} y PM₁₀. En la Tabla 7 se presenta el análisis de datos de ese periodo por ubicación. Para la USAC, no se muestran valores

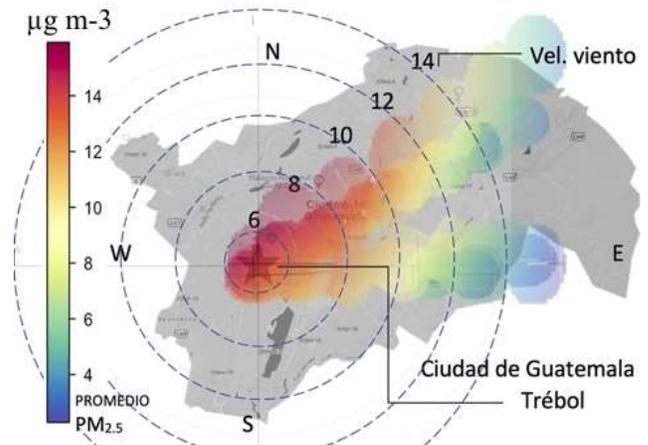
para PM_{10} porque no superan las concentraciones de los valores criterio de OMS.

Tabla 7. Concentraciones atípicas después del evento de la quema del diablo

Puntos de muestreo	Promedios $\mu\text{g m}^{-3}$	Mínimos $\mu\text{g m}^{-3}$	Máximos $\mu\text{g m}^{-3}$	Periodo de tiempo hh:mm:ss
Bolívar				
PM_{10}	144	50	266	23:16:44 a 23:37:04
$PM_{2.5}$	78	26	140	23:19:16 a 23:42:09
Trébol				
PM_{10}	115	47	216	22:49:21 a 23:22:30
	111	55	179	
$PM_{2.5}$	69	23	148	22:41:42 a 23:40:20
				23:53:09 a 23:55:39
USAC				
$PM_{2.5}$		29	31	23:53:09 a 23:55:39

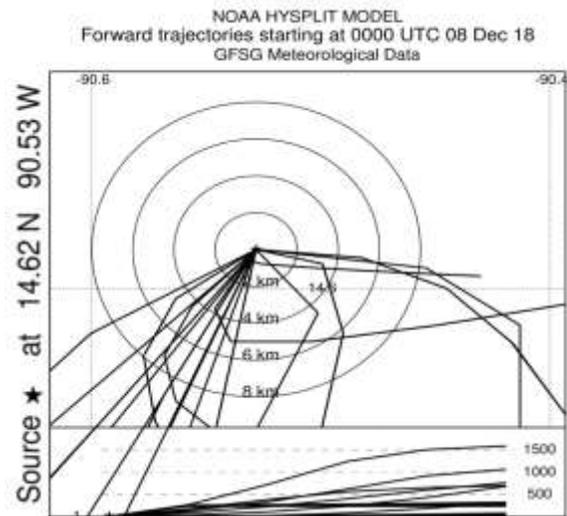
Se realizó un promedio de las tres ubicaciones de los sensores por concentraciones de $PM_{2.5}$ ($12 \mu\text{g m}^{-3}$), se tomó como punto central el trébol, mostrando que las velocidades del viento menores a 11 km/h del este y de 8 km/h del noreste presentan contaminaciones promedio mayores a los $14 \mu\text{g m}^{-3}$, Figura 6.

Figura 6. Gráfica polar de velocidades del viento y material particulado promedio $PM_{2.5}$



Se consideró la trayectoria de las partículas en el ambiente durante el día del evento de la quema del diablo, utilizando un modelo de dispersión de velocidad vertical, a una altura cercana de la superficie del suelo, en el cual presenta el escenario de las posibles trayectorias de las partículas, teniendo como punto de partida el punto de muestreo Trébol, Figura 7.

Figura 7. Mapa de trayectoria de las partículas en el ambiente en Guatemala



Modelo de dispersión de NOAA HYSPLIT, durante el 7 de diciembre del 2018 a las 18:00, muestra las posibles trayectorias de partículas en el ambiente sobre el área metropolitana, siendo afectadas por el

desplazamiento de las partículas durante la quema del diablo las áreas localizadas al suroeste y oeste suroeste, como Villa Nueva, Amatitlán, San Miguel Petapa, Palfn entre otras, ver Figura 8.

Figura 8. Mapa de la trayectoria de la contaminación del aire por material particulado sobre el área metropolitana el 07 de diciembre 2018 18:00 CST



Análisis de resultados

El análisis se basa en las guías de calidad del aire de la OMS para material particulado (OMS, 2006), el promedio diario antes del evento y el comportamiento de la concentración de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, después de las 18:00. El promedio de 24 horas no es referente de comparación para el evento de calidad del aire para la quema del diablo, debido a la gran dispersión de los datos, principalmente hacia los valores altos, donde la desviación estándar está cercana al promedio o bien lo supera, por lo que segmentar el tiempo de muestreo, es más adecuado para hacer un análisis de lo ocurrido de las 00:00 y 18:00 horas, y cuando se presenta el evento de la quema del diablo, a partir de las 18:00 horas.

En el periodo entre 00:00 a 18:00 horas el promedio de concentración de PM₁₀, para las tres ubicaciones de muestreo se situó entre 10 a 17 µg m⁻³, con mínimos entre 2 a 6 µg m⁻³ y máximos entre 24 a 75 µg m⁻³ y para PM_{2.5} el promedio de concentraciones para los tres puntos de muestreo se situó entre 6 a 10 µg m⁻³, con mínimos entre 2 a 3 µg m⁻³ y máximos entre 17 a 54 µg m⁻³. Los promedios para ambos parámetros, en las tres ubicaciones de muestreo no superan la guía de la OMS; en el punto Bolívar las concentraciones

fueron muy estables y los máximos no superan dicha guía, ver Tabla 4; en el Trébol por su ubicación sobre una vía de alto tránsito, la dispersión para ambos parámetros fue mayor a lo largo del periodo de análisis, en este punto los máximos superan la guía de OMS, con valores para PM₁₀ de 73 y PM_{2.5} de 54 µg m⁻³. En la USAC con características de área de educación, transporte, servicios e industria, presenta mucha variación en el periodo de análisis y únicamente la concentración máxima de PM₁₀ supero la guía de la OMS con una concentración de 75 µg m⁻³, ver Figura 2 y 3. Las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} se incrementan después de las 18:00 horas, a consecuencia de la quema del diablo.

En la estación Bolívar, las concentraciones de PM₁₀ se incrementan a partir de las 17:58, el valor máximo fue de 179 µg m⁻³ a las 18:03 y después desciende sobre el periodo anterior a la quema del diablo, se mantuvo hasta las 21:25, duración de 03:24 horas en este periodo el promedio fue de 57 µg m⁻³ el cual superó la guía de la OMS para PM₁₀. La mayor frecuencia se estableció en el intervalo de concentraciones entre 50 a 59 µg m⁻³, seguido de intervalo entre 40 a 50 µg m⁻³ y el percentil 46 es igual a 50 µg m⁻³, que significa que el 46% del tiempo de muestreo las concentraciones fueron iguales o menores a 50 µg m⁻³, ver Tabla 6. Con relación a PM_{2.5} las concentraciones se incrementan a partir de las 18:06, ya que alcanzaron el máximo de 79 µg m⁻³, las concentraciones descendieron a las 21:25 durante un periodo de tiempo de 03:19, el promedio fue de 32 µg m⁻³, la mayor frecuencia se estableció en el intervalo de concentraciones entre 25 a 34 µg m⁻³, seguido de intervalo entre 15 a 24 µg m⁻³ y el percentil 29 es igual a 25 µg m⁻³, que significa que el 29% del tiempo de muestreo las concentraciones fueron iguales o menores a 25 µg m⁻³.

En el Trébol, la ubicación está influenciada por el tráfico vehicular, el comportamiento de PM₁₀ se nota en la Figura 3 y 5, las concentraciones a partir de las 18:17, el promedio fue de 51 µg m⁻³ que supera ligeramente la guía de la OMS, que alcanzó el máximo de 68 µg m⁻³ por 00:12 minutos después del inicio del evento, las concentraciones descienden después de las 20:27, teniendo una duración de 02:30. La mayor frecuencia se estableció en el intervalo de concentraciones entre 50 a 59 µg m⁻³, seguido de intervalo entre 40 a 49 µg m⁻³ y el percentil 42 es igual

a $50 \mu\text{g m}^{-3}$, que significa que el 42% del tiempo de muestreo las concentraciones fueron iguales o menores a $50 \mu\text{g m}^{-3}$.

En relación a $\text{PM}_{2.5}$ el aumento de las concentraciones se inició a 18:09 y descienden a las 20:33, durante un tiempo de 02:33 con promedio de $32 \mu\text{g m}^{-3}$, con valor máximo de $52 \mu\text{g m}^{-3}$ que se alcanzó a las 18:12, la mayor frecuencia fue en el intervalo entre 25 a $34 \mu\text{g m}^{-3}$, seguido del intervalo 30 a $35 \mu\text{g m}^{-3}$, el percentil 8 fue $25 \mu\text{g m}^{-3}$, significa que el 8% del tiempo de muestre los valores son iguales o menores a $25 \mu\text{g m}^{-3}$.

En la USAC, se presentan características de baja población vecina, transporte, comercio y área industrial que influyen en el comportamiento del material particulado, ver Figura 2. Las concentraciones para PM_{10} aumentan a partir de las 17:56, pasando de 8 a $18 \mu\text{g m}^{-3}$ y a partir de 19:01 superan la guía de OMS, esto fue únicamente por 00:09, alcanzaron un valor promedio de $54 \mu\text{g m}^{-3}$, con relación a $\text{PM}_{2.5}$ a las 18:24, se superan los valores de las guías de OMS y esto dura hasta las 19:14, tiempo de 49:00 el promedio en este periodo fue de $29 \mu\text{g m}^{-3}$, con mínimos de $24 \mu\text{g m}^{-3}$ y máximos de $35 \mu\text{g m}^{-3}$, el percentil 13 igual a $25 \mu\text{g m}^{-3}$, que significa que únicamente el 13% del tiempo las concentraciones fueron menores o igual a $25 \mu\text{g m}^{-3}$, la mayor frecuencia se presentó en el intervalo entre 25 a $29 \mu\text{g m}^{-3}$, seguido del intervalo entre 30 a $34 \mu\text{g m}^{-3}$.

Por la dirección y velocidad del viento registrado entre las 18:00 a 23:59 horas indica que los vientos provienen del noreste y estenordeste, con rango de velocidades entre 9.7 a 3.3 km/h, por lo que existen amplias posibilidades que las partículas suspendidas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ provoquen picos de contaminación entre las 22:41 a 23:55 horas, las concentraciones en este periodo superan los valores de las guías de la OMS, con picos que puede llegar a supera los $111 \mu\text{g m}^{-3}$ para PM_{10} y $70 \mu\text{g m}^{-3}$ para $\text{PM}_{2.5}$. Esta probabilidad existe ya que las partículas finas pueden ser transportadas por el viento cientos de kilómetros (Wilson and Spengler, 1996) y por la velocidad del viento y dirección estas partículas pueden originarse en lugares lejanos como la zona 6 y 18, al arrastrar partículas de las zonas 1, 2, 4, 5, 8 y 12.

Conclusión

Las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , se incrementan a partir de las 18:00 horas que coincide con la quema del diablo, ya que se genera una contaminación del aire en el ambiente que puede llegar a ser dañina para la salud. Antes de las 18:00 horas la ubicación del Trébol fue la que presento mayores niveles de contaminación del aire; durante y después de las 18:00 horas la ubicación de Bolívar fue la que registro mayores niveles de contaminación del aire.

Los valores más altos de material particulado se presentan de forma inmediata al inicio del evento superando las guías de calidad del aire de la OMS para $\text{PM}_{2.5}$ de $25 \mu\text{g m}^{-3}$ y PM_{10} de $50 \mu\text{g m}^{-3}$, como es el caso del $\text{PM}_{2.5}$ donde se alcanzaron valores promedio entre 29 a $31 \mu\text{g m}^{-3}$, el valor máximo de $79 \mu\text{g m}^{-3}$ se registró en Bolívar; Para PM_{10} el rango de promedios se encuentra entre 51 a $57 \mu\text{g m}^{-3}$, llegando a alcanzar valores máximos de $179.20 \mu\text{g m}^{-3}$ registrado en Bolívar. El tiempo de duración de contaminación del aire por $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} supera tres horas en Bolívar, dos horas en Trébol, excepto en la USAC, donde el tiempo de exposición para PM_{10} no supera 00:10 minutos, no así el $\text{PM}_{2.5}$ que dura en promedio 00:50 minutos.

Las condiciones meteorológicas como la velocidad y dirección del viento que predominaron del estenordeste

influyeron en la contaminación del aire en el transporte y dispersión de partículas, el incremento de las concentraciones de material particulado durante y después de la quema del diablo también pudo ser influenciado por la inversión térmica, limitando los movimientos verticales del aire en el ambiente. Las trayectorias de dispersión de la dirección de contaminación del aire mostro que las áreas posiblemente más afectadas son las que se ubican al suroeste del área metropolitana debido al desplazamiento de las partículas durante la quema del diablo.

Agradecimientos

A la estación de bomberos municipales del Trébol y la Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media, de la Universidad de San Carlos EFPEM, por permitir la instalación de los equipos de monitoreo y

suministrar en acceso a la red de internet para los datos en tiempo real y forma continua.

Referencias

- Bell, M y Samet, J. (2010). Salud Ambiental de lo Global a lo Local, Howard F, Editor, Organización Panamericana de la Salud, Washington, D.C.OPS.
- Carslaw, D.C. and K. Ropkins, (2012). OpenAir — an R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, pp. 52–61.
- Davis RE, Kalkstein, LS. Development of an automated spatial synoptic climatology classification. *Int J Climatol* 1990, 10: 769-94.
- Draxler RR. Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories (HYSPLIT) version 3.0 – Users’s guide and model description. 1992, NOAA Tech. Memo. ERLARI-195, 26pp. appen-dices.
- Hayas Barrú, Antonio (2015), meteorología y contaminación atmosférica. Peculiaridades de la zona urbana de Jaén, Facultad de Ciencias Experimentales, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Jaén.
- Hemond H & Fechner E. (2015). Chemical fate and transport in the environment, third edition, Elsevier.
- Lara, C. (1975). Tradiciones de Guatemala, breves apuntes para el estudio de una fiesta pulular, siete de diciembre: día de la quema del diablo, Centro de Estudios Folclóricos, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pérez-Vidal, H, Lunagomez-Rocha, MA, Acosta-Pérez. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. Universidad y Ciencias, vol .26. 151-162.
- Pope, C.A. (2000). What do epidemiologic findings tell us about health effects of environmental aerosols?, *Journal of Aerosol Medicine-Deposition Clearance and Effects in the Lung*, 13. 335–354.
- Rosales-Castillo, JA, Torres-Mesa VM, Olaiz Fernández G, Borja -Aburto VH. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos, *Salud Publica Mex.* 544-555.
- Saravia C. (2016). Integrated air quality management in Guatemala: Fine particulate Matter, Final Paper, 39 International Postgraduate Course on Environmental Management for Developing Countries, CIPSEM, FMEMCBMS, UNEP, UNESCO, University of Dresden, Germany.
- World Health Organization, (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide, WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, Geneva Switzerland, 2006.

<https://radioinfinita.com/2018/12/cuanta-contaminacion-genera-la-quema-del-diablo/>, 4 diciembre 2018.