

Estimación de la estabilidad atmosférica para la ciudad de Zacatecas

Verónica Ramírez-Díaz¹, Miguel Mauricio Aguilera-Flores¹, David Enrique Flores-Jiménez², Verónica Ávila-Vázquez^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional – Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas. Blvd. del Bote 202 Cerro del Gato Ejido La Escondida, Col. Ciudad Administrativa 98160 Zacatecas, Zac., México. Tel 01-492-92-42-419

²Instituto de Ingeniería UABC Campus Mexicali, Calle de la Normal S/N y Blvd. Benito Juárez, Col. Insurgentes Este Mexicali B. C 21280

* Corresponding author: yav_taba@hotmail.com

Contaminación de agua suelo y aire (Monitoreo de contaminantes).

Resumen: En el presente trabajo, debido a la importancia de la dispersión de contaminantes en el aire, se hizo uso de la clasificación modificada de Pasquill-Gifford para determinar las clases de estabilidad atmosférica, las cuales sirven para identificar de manera indirecta el aumento o disminución de la turbulencia mecánica y convectiva existente, condiciones que al mismo tiempo afectan la dispersión de contaminantes; lo anterior se realizó en el municipio de Zacatecas en los años de 2019 y 2020; se contrastaron los datos de concentraciones de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} arrojados de la estación de monitoreo “Explanada del congreso” con las clases de estabilidad atmosférica estimadas con el fin de observar la influencia de estas clases en dichos contaminantes; y por último, con base en los resultados obtenidos, se identificó en qué estaciones del año existe una mayor y menor dispersión de contaminantes. Llevado a cabo este proceso, se emitió una serie de recomendaciones acerca de la factibilidad del uso de esta clasificación en la ciudad de Zacatecas. Se obtuvo mayor frecuencia de condición muy inestable en mayo con 50.85% y menor frecuencia en diciembre con 33.24%. Mientras que la mayor concentración mensual de partículas PM_{2.5} fue de 10.58 $\mu\text{g m}^{-3}$ en abril y para PM₁₀ fue de 61.95 $\mu\text{g m}^{-3}$ en marzo. También se determinó que en las estaciones de primavera y verano existe una mayor concentración horaria entre las 8:00-10:00 horas de partículas PM_{2.5} llegando a tener 11.73 y 7.58 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente, y una mayor concentración de partículas PM₁₀ para primavera e invierno a las 14:00 horas llegando a tener en cada una concentración de 52.11 y 37.07 $\mu\text{g m}^{-3}$, cada una. Respecto a estos resultados, se encontró una relación horaria de concentración de partículas PM_{2.5} con las clases de estabilidad obtenidas.

Palabras clave: concentración; contaminantes; convección; estabilidad atmosférica.

Estimation of atmospheric stability for the city of Zacatecas

Abstract: In the present work, due to the importance of the dispersion of pollutants in the air, the modified Pasquill-Gifford classification was used to determine the classes of atmospheric stability, which serve to indirectly identify the increase or decrease of the existing mechanical and convective turbulence, conditions that at the same time affect the dispersion of pollutants; the above was carried out in the municipality of Zacatecas in the years of 2019 and 2020; the data of concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} particles released from the monitoring station "Explanada del congreso" were contrasted with the estimated atmospheric stability classes in order to observe the influence of these classes on these pollutants; and finally, based on the results obtained, it was identified in which seasons of the year there is a greater and lesser dispersion of pollutants. Once this process was carried out, a series of recommendations were issued about the feasibility of using this classification in the city of Zacatecas. The highest frequency of very unstable condition was obtained in May with 50.85% and less frequency in December with 33.24%. While the highest monthly concentration of PM_{2.5} particles was 10.58 $\mu\text{g m}^{-3}$ in April and for PM₁₀ it was 61.95 $\mu\text{g m}^{-3}$ in March. It was also determined that in the spring and summer seasons there is a higher hourly concentration between 8:00-10:00 hours of PM_{2.5} particles reaching 11.73 and 7.58 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively, and a higher concentration of PM₁₀ particles for spring and winter at 14:00 hours reaching each concentration of 52.11 and 37.07 $\mu\text{g m}^{-3}$, each. Regarding these results, an hourly relationship of concentration of PM_{2.5} particles with the stability classes obtained was found.

Keywords: atmospheric stability; concentration; contaminants; convection.

Introducción

El crecimiento constante de la población en las zonas urbanas ha traído consigo una mayor concentración de las actividades económicas y productivas, que bajo ciertas circunstancias agudizan problemáticas relacionadas con la mala calidad del aire. Una de ellas es la de ser la principal causa ambiental de muertes prematuras a nivel mundial (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

En México, en el año 2010, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014a) evaluó el impacto económico y sobre la salud de la calidad del aire en las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), Guadalajara (ZMG) y Monterrey (AMM), encontrando que si se cumplieran los límites recomendados por la Organización Mundial

de la Salud para la concentración de partículas $PM_{2.5}$ se evitarían pérdidas económicas por 45,000 millones de pesos y 2,170 muertes prematuras. Considerando lo establecido en la normatividad mexicana para este mismo tipo de partículas, si su concentración se mantuviera por debajo del límite determinado, se evitaría un gasto de 27,000 millones de pesos y alrededor de 1,317 muertes prematuras (SEMARNAT, 2018).

En cuanto al Estado de Zacatecas, la mortalidad prematura, atribuibles a la contaminación de aire por $PM_{2.5}$ ocasionó una pérdida de productividad por 151.4 millones de pesos. Los costos por pérdida de productividad por contaminación de $PM_{2.5}$, debido tanto a la causa mencionada como a enfermedades cardiovasculares, enfermedades isquémicas del corazón y enfermedades cardiopulmonares fueron de 55.6, 61.9 y 110.8 millones de pesos constantes del año 2018 (Secretaría del Agua y Medio Ambiente & SEMARNAT, 2018).

En este contexto, la dispersión de contaminantes juega un papel esencial para disminuir su concentración en el aire y que la exposición sea menor en las personas. Aquí es donde entra, la estabilidad atmosférica la cual describe la tendencia para el mezclado horizontal y vertical en la atmósfera. Este factor se mide de forma zonal, ya que tanto las condiciones de velocidad de viento, como radiación solar, temperatura y nubosidad varían de zona a zona, por lo cual no existen datos nacionales. No se tienen datos estatales ni municipales de estimaciones de estabilidad atmosférica.

Uno de los métodos para estimar la estabilidad atmosférica es la clasificación de Pasquill-Gifford, que asigna letras de la A hasta la G para el incremento de estabilidad atmosférica, denominadas clases de estabilidad. Por lo que en este proyecto se hizo uso de esta metodología con la hipótesis de que las clases de estabilidad atmosférica de la Ciudad de Zacatecas permitirán demostrar que se presenta una adecuada dispersión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los periodos cálidos del año. El objetivo general del proyecto fue determinar en qué periodos del año se puede presentar una mayor o menor dispersión de contaminantes $PM_{2.5}$ y PM_{10} a partir de la estimación de la estabilidad atmosférica con la clasificación modificada de Pasquill-Gifford y la principal aportación es un estudio de la dispersión de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} dependiendo de la condición atmosférica horaria y mensual en la ciudad de Zacatecas.

Materiales y Métodos

Para la realización de los puntos siguientes, se hizo uso de equipo de cómputo con conexión a internet en donde se utilizaron una hoja de Excel, programa en lenguaje C++, bases de datos sistema de información geográfica y revisión bibliográfica.

Descripción del área de estudio

El municipio de Zacatecas es la capital del Estado y se encuentra ubicado al centro sudeste del Estado con una población de 149,607 habitantes en el año 2020 (INEGI, 2020). Tiene clima árido templado el cual alcanza una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C; y clima semiárido templado con una temperatura media anual igual a la mencionada (INEGI, 2017). Debido a que la dispersión de contaminantes depende de varios factores, entre ellos el relieve, en la Figura 1 se observa que la estación de monitoreo se encuentra en una zona urbana y también se observa con mayor detenimiento el relieve en el que se encuentra, donde la mayor concentración de edificaciones se encuentran del sudeste al sudoeste y dos cimas a 2,600 m.s.n.m. al noreste y noroeste de la estación de monitoreo.

Colección de datos

Los datos de concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, fueron brindados por parte de la Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA) con datos a partir del año 2019 hasta el 2020. Estos datos son obtenidos con el uso de la estación de monitoreo de calidad del aire perteneciente a la red de monitoreo de calidad del aire del Estado de Zacatecas “Explanada del congreso”, la cual está ubicada geográficamente a 22°77” de latitud Norte y 102°57” de longitud Oeste, y está ubicado a una altitud aproximada de 5 m del nivel del suelo y a una altitud de 2,465 m.s.n.m.

Los datos de radiación, velocidad, dirección de viento y humedad relativa se obtuvieron directamente de la página oficial del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) para los mismos años, y la nubosidad fue obtenida de un análisis estadístico de informes climatológicos históricos por hora y reconstrucciones de modelos del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2016. Los datos climatológicos, entre ellos, la nubosidad, se obtuvieron

de MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis de NASA, la resolución espacial es de 50 km en la dirección latitudinal (*Clima Promedio En Zacatecas, México, Durante Todo El Año - Weather Spark, n.d.*).

Posterior a la colección de datos se calcularon promedios de todos los meses para radiación ($W m^{-2}$) y velocidad de viento ($m s^{-1}$) dividiendo el tiempo de día y de noche. El tiempo nocturno fue asignado cuando la incidencia de radiación fue menor a $10 W m^{-2}$, ya que mediante la observación de datos se identificó que existían datos de radiación solar en horario nocturno menores a ese valor, estos datos se tomaron como cero, ya que no es posible la incidencia de radiación solar en tiempo nocturno.

También con estos datos se obtuvieron gráficas radiales de dirección y velocidad de viento, los rangos de velocidad de viento se asignaron de acuerdo a la escala de Beaufort (INECC, 2009). Con los datos de humedad relativa, se obtuvo una gráfica de promedios mensuales para observar su posible relación con la concentración de contaminantes.

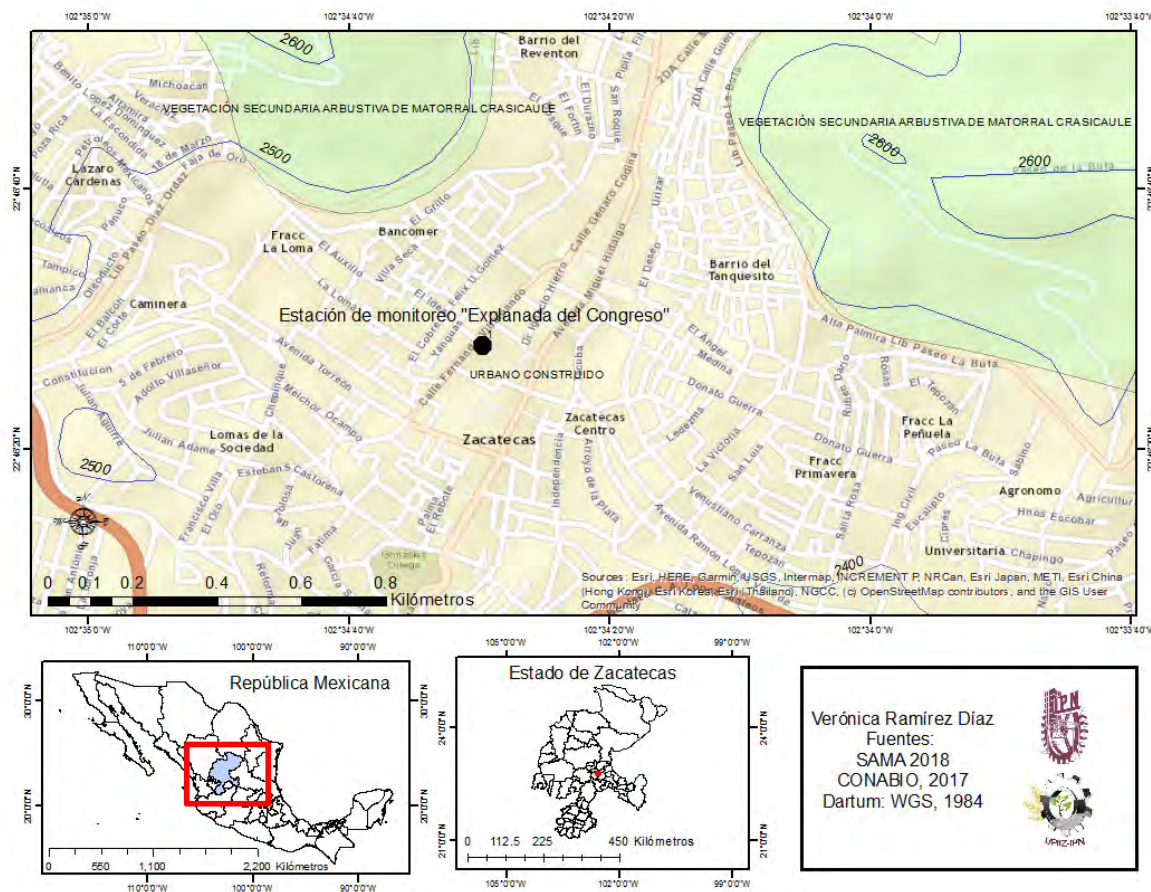


Figura 7. Área de estudio cercana a la estación de monitoreo.

Clasificación de datos

La clasificación de datos se realizó por medio de la clasificación modificada de Pasquill-Gifford (Davies & Singh, 1985), la cual tiene seis categorías, desde muy inestable (A) a extremadamente estable (G). Y debido a la casi nula o ausencia absoluta de radiación cuando esta no incide en el suelo, la clasificación considera dos tiempos, el de día y el de noche. El primero se clasifica usando la velocidad de viento en unidades de metros por segundo ($m s^{-1}$) y la cantidad de insolación en unidades de medida de watts por metro cuadrado ($W m^{-2}$).

La insolación en este tiempo, se clasifica en “Fuerte” cuando es menor a $600 W m^{-2}$, “Moderada” cuando es de $300-600 W m^{-2}$, “Ligera” cuando el valor es menor a $300 W m^{-2}$; cuando existe nubosidad en el día, los valores varían entre C (ligeramente inestable) y D (neutral). Esta clasificación se muestra de manera concisa en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación modificada de Pasquill-Gifford para el tiempo de día (Davies & Singh, 1985).

Velocidad de viento ($m s^{-1}$)	Insolación en el tiempo de día ($W m^{-2}$)			Radiación en tiempo nublado
	Fuerte	Moderada	Ligera	
<2	A	A-B	B	C
2-3	A-B	B	C	C
3-5	B	B-C	C	C
5-6	C	C-D	D	D
<6	C	D	D	D

Para el tiempo de noche, se tomó en cuenta la cobertura de nubes con unidad de medida de octas, la cual indica en octavos la cobertura de nubes en el cielo, es decir, si se tiene una nubosidad de 0 octas, indica un cielo despejado, en cambio si es una nubosidad de 8 octas, el cielo está completamente nublado (BBCi - Weather Centre - WeatherWise - Weather Station - Cloud, 2003). También se tomó en cuenta que una hora antes de la puesta de Sol y después del amanecer, la estabilidad es neutral (D). Esta clasificación se muestra de manera concisa en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación modificada de Pasquill-Gifford para el tiempo de noche (Davies & Singh, 1985).

Velocidad de viento ($m s^{-1}$)	1 h antes de la puesta de sol o después de la puesta de sol	Cobertura de nubes (Octas) en tiempo de noche		
		0-3	4-7	8
<2	D	F o G	F	D
2-3	D	F	E	D
3-5	D	E	D	D
5-6	D	D	D	D
<6	D	D	D	D

La forma de clasificar los datos de ambos tiempos fue por medio de la elaboración de dos programas en CodeBlocks en lenguaje C++.

Se determinó la frecuencia de las clasificaciones de estabilidad atmosférica en cada mes, así como por día, y se identificó en qué periodos podría favorecerse o no la dispersión de contaminantes por mes. Después de observar una relación de las clases de estabilidad de todo el año con las estaciones del año, se procedió a realizar gráficas de clases de estabilidad por hora para cada una.

Por último, se contrastó la frecuencia de las estabilidades estimadas en cada mes con los datos de concentración de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , determinando en qué meses existe una mayor o menor dispersión de contaminantes. Llevado a cabo este proceso, se emitió una serie de recomendaciones acerca de la factibilidad del uso de esta clasificación en la ciudad de Zacatecas.

Resultados y Discusión

La estación de monitoreo se encuentra ubicada dentro de una zona urbana y la emisión de ambas partículas se asocia principalmente a fuentes móviles que son vehículos mayormente particulares que transitan alrededor de la estación de monitoreo y fuentes de área como lo son restaurantes, tintorerías, resuspensión de polvos de caminos, entre otras. Estas fuentes de área se encuentran ubicadas mayormente del suroeste al sureste con distancias menores a 3 kilómetros y Rojas y Garibay (2009), mencionan que las partículas PM_{10} suelen permanecer suspendidas en la atmósfera hasta varias horas tras su emisión y desplazarse distancias menores a 10 kilómetros antes de que se depositen.

Con objetivo de analizar la dirección y velocidad del viento se realizaron gráficas radiales con la escala de Beaufort para cada mes, los cuales se muestran en la Figura 2, donde se pueden observar tres principales comportamientos:

- De febrero a mayo la dirección se da desde el sudeste y sudoeste hacia el noroeste y noreste respectivamente.
- De junio a octubre la dirección es mayormente del este, sudeste y sur hacia el oeste, noreste y norte.
- De noviembre a enero la velocidad y dirección del viento se distribuye desde el sudoeste, sur, sudeste, hacia el noreste, norte y noroeste.

En abril también se observa una consistencia de velocidad de viento de $1.6-3.3 \text{ m s}^{-1}$ desde el sudoeste al noroeste.

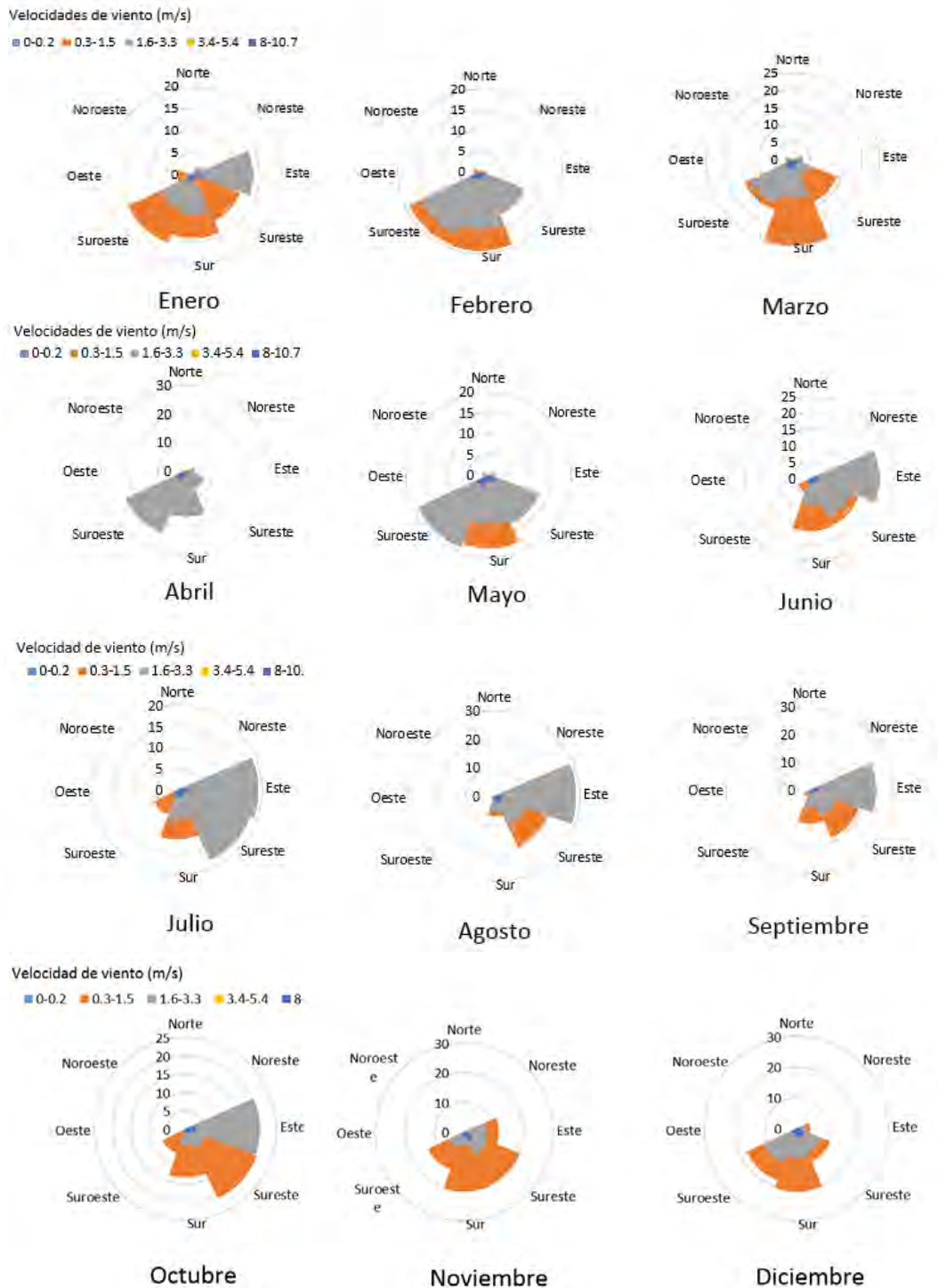


Figura 2. Dirección y velocidad de viento para cada mes de los años 2019-2020.

La clasificación de Pasquill-Gifford, se fundamenta en que la condición cerca del suelo depende esencialmente de la radiación solar neta y de la velocidad del viento (Rodríguez & Romero K.J., 2018). En donde, a menor velocidad de viento existe una mayor inestabilidad (A) y cuando existe una mayor velocidad de viento, la estabilidad atmosférica se designa como neutral (D).

De acuerdo con el método, aumentar la velocidad del viento reduce la inestabilidad durante el día (Kahl & Chapman, 2018), esto se debe a que la estabilidad atmosférica según Zoras y otros (2006) se puede definir como la tendencia

atmosférica a resistir o mejorar el movimiento vertical o, alternativamente, a suprimir o aumentar la turbulencia existente (Zoras et al., 2006). Y según Shenelle y Dey (2000), generalmente, cuando predomina la turbulencia convectiva, los vientos son débiles y la atmósfera está en condiciones inestables (Shenelle & Dey, 2000). También de acuerdo con el método, las nubes diurnas tienen un efecto indirecto, reduciendo la insolación y por lo tanto reduciendo la inestabilidad (Moragues, 2002).

En la Figura 3 se muestran las frecuencias de las estabildades atmosféricas obtenidas con la clasificación modificada de Pasquill-Gifford para el tiempo de día, donde el mes con mayor inestabilidad atmosférica (A y A-B) es el mes de mayo con una frecuencia en la clase A de 50.85% (mes con mayor radiación solar) seguido de marzo con una frecuencia en esta misma clase de 45.77% lo que indica un aumento del movimiento vertical de masas de aire. El mes de enero presentó una menor frecuencia de esta clase, con 34.68% (uno de los meses con menor incidencia de radiación solar). Se observa un pequeño aumento en la estabilidad atmosférica neutral (C) en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, y una baja en la clase A con una frecuencia de 34.68, 37.28, 35.79 y 33.24%, respectivamente los cuales son mayormente meses de invierno lo que indica que en esos meses existe un ligero aumento en la velocidad de viento y existe una radiación solar ligera o moderada, por lo que la neutralidad en la atmósfera tiende a aumentar.

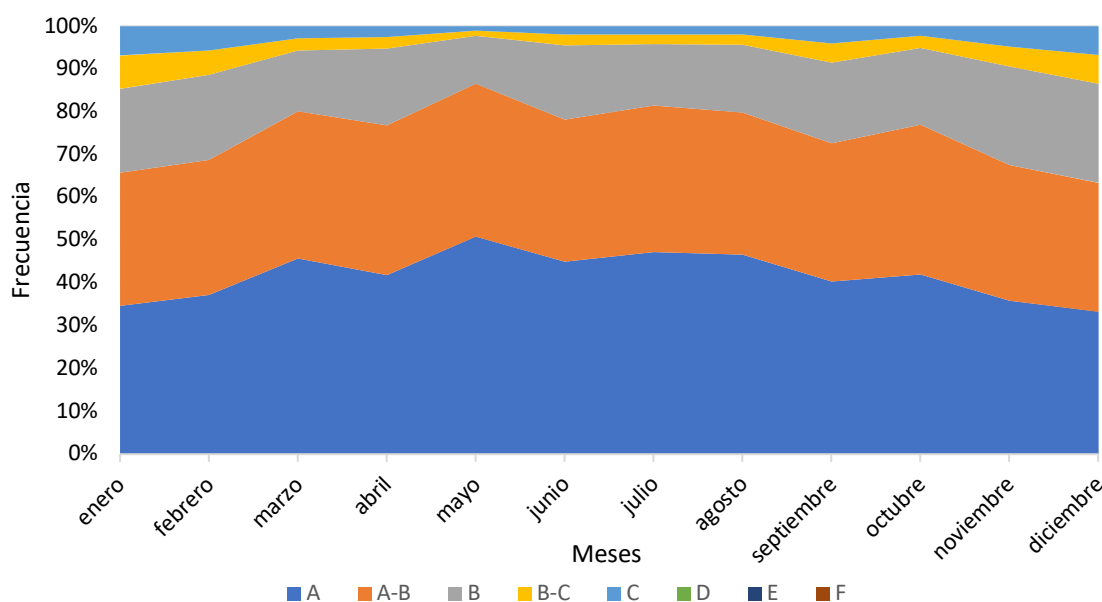


Figura 3. Frecuencias de clases de estabilidad atmosférica para el tiempo de día para los años 2019-2020.

El tiempo de noche se define como el período desde una hora después de la puesta del sol, hasta una hora antes de su salida, y la nubosidad se mide en octas, es decir, 0/8 equivale al cielo totalmente despejado, 4/8 a la mitad del cielo cubierto y 8/8 es equivalente al cielo cubierto por completo (Rodríguez & Romero K.J., 2018). Las nubes en el tiempo de noche reducen la estabilidad (Moragues, 2002), como se observa en la Tabla 2, esta clasificación no tiene ningún efecto durante los períodos de transición día/noche, clasificando a estas horas como neutral (D) (Kahl & Chapman, 2018).

Por la noche, la radiación térmica de las nubes reduce el enfriamiento de la superficie (Venkatram, 1996) y en la clasificación modificada de Pasquill-Gifford se asume que en estas condiciones existe una clase neutral (D), en cambio cuando no existe nubosidad, la estabilidad puede llegar a ser extrema (G) (Tabla 2) donde se asume que la turbulencia convectiva es casi nula.

En la Figura 4 se presentan las frecuencias de las clases de estabilidad para el tiempo de noche para los años 2019-2020 en donde existe una frecuencia notoria de clase neutral (D) en los meses de junio a noviembre, estos son meses de la estación de verano que se caracteriza por tener mayor precipitación al año. También se observa un aumento de frecuencia de la clase F en el mes de mayo con un valor de 77.44%, y en los meses de febrero y marzo es de 70.94% y 68.36% respectivamente, este aumento de clase estable (F) se atribuye específicamente a que la velocidad de viento

se encuentra con mayor frecuencia entre los $0.5 - 3 \text{ m s}^{-1}$ y la nubosidad es mayormente nula, entonces al ser meses considerados fríos y existir poca o nula nubosidad, no existe reducción de enfriamiento de la superficie y por lo tanto el movimiento convectivo así como el turbulento (viento) se ven afectados y disminuidos drásticamente.

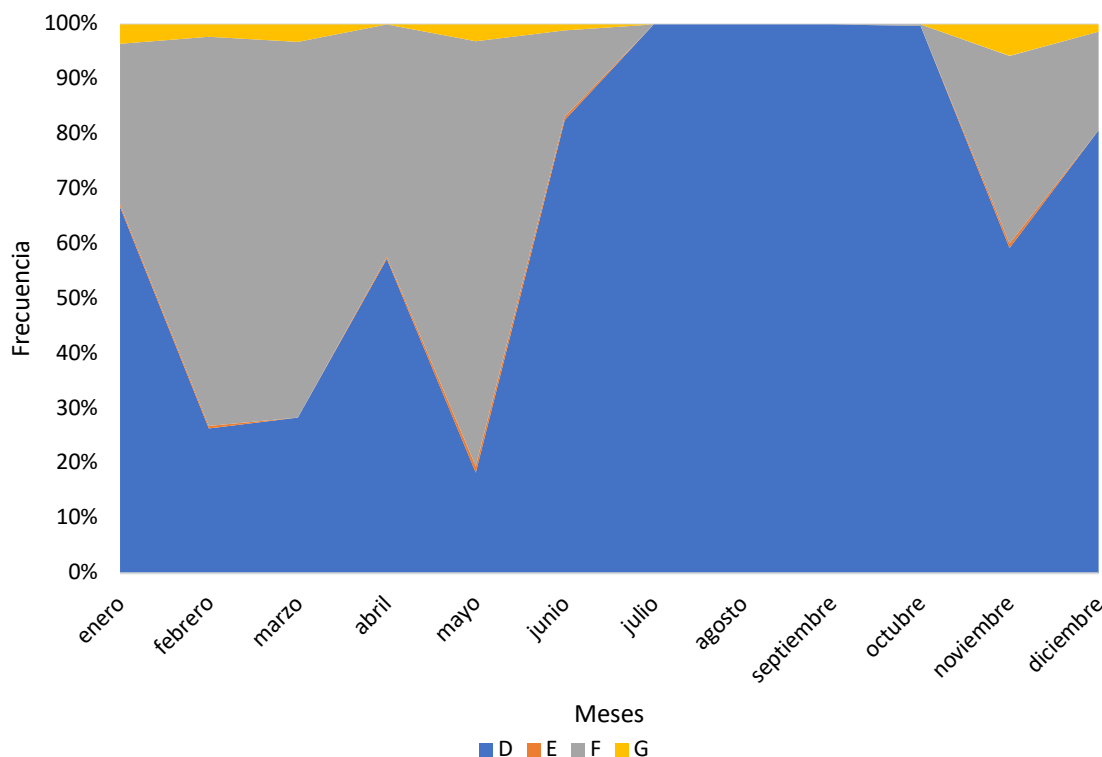


Figura 4. Frecuencias de clases de estabilidad atmosférica para el tiempo de noche para los años 2019-2020.

Después de observar una relación de las clases de estabilidad de todo el año con las estaciones del año, se procedió a hacer lo mismo, pero para las condiciones horarias para cada estación del año (Martínez, 2011).

En la Figura 5 se muestran todas las estaciones del año y las frecuencias obtenidas para cada hora, se puede observar que los picos máximos de inestabilidad (A) se encuentran entre las 9:00 y 12:00 horas con frecuencias máximas de 52.22% para la primavera, 53.57% para el verano, 44.87% para el otoño y 40% para el invierno. Para la estación de verano se observa una marcada frecuencia en la clase D debido a la nubosidad que existe en esas fechas y a los altos niveles de precipitación.

También se observa que en las noches de invierno y primavera existe una gran frecuencia de la clase estable (F), con una frecuencia máxima de 80.45% en invierno entre las horas de 18:00-21:00 y una frecuencia máxima en primavera entre las horas de 0:00-2:00 de 83.51%, esto se atribuye a la poca nubosidad que existe en esas horas, ya que no existe una barrera de nubes que reduzca el enfriamiento de la superficie, por consiguiente, la turbulencia convectiva disminuye drásticamente. A pesar de que la clase G (extremadamente estable) se da en condiciones específicas (menor a 0.5 m s^{-1} y 0 octas), se pudo obtener una frecuencia máxima de 5.8% y 5.6% para otoño e invierno, respectivamente. Las clases de B-C y E se observan muy poco debido a que las velocidades de viento de $3-5 \text{ m s}^{-1}$ son muy pocas en todo el año.

El ancho de las “campanas” del tiempo de día es mayor en las estaciones de primavera y verano debido a que la incidencia de la radiación solar dura más tiempo en esas estaciones a diferencia del ancho de las “campanas” de las estaciones de otoño e invierno. También se observa un pequeño pico de la clase A y A-B en el tiempo de día alrededor de las 15:00 y 17:00 horas en todas las estaciones del año, esto se debe a que la radiación tiene también un pequeño pico de incidencia de radiación solar en esas horas según promedios obtenidos por hora para cada estación del año.

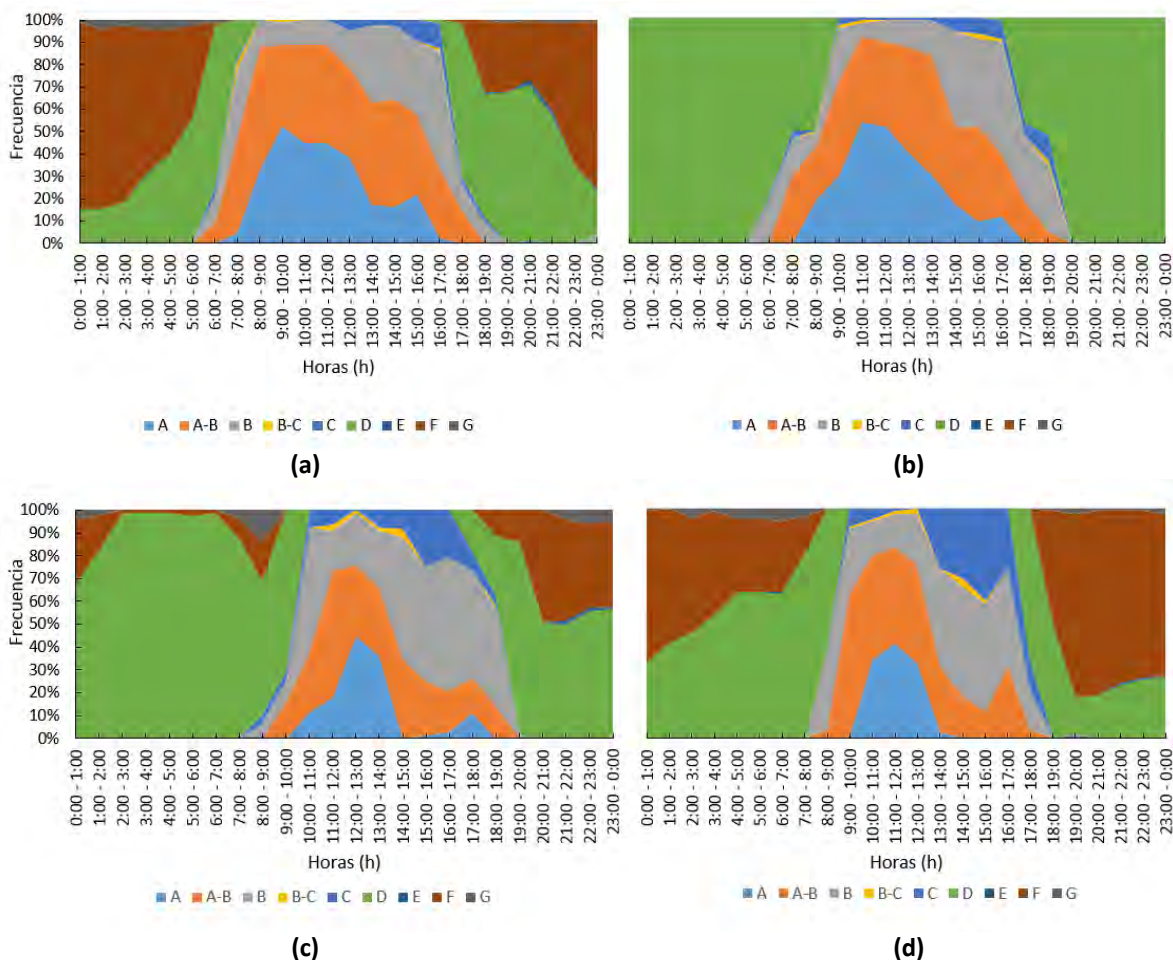


Figura 5. Frecuencias horarias de las clases de estabilidad atmosférica para las estaciones del año: a) primavera b) verano c) otoño d) invierno.

Partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ y su relación con la estabilidad atmosférica

El diámetro aerodinámico de las partículas está en función de los procesos de formación de las partículas; frecuentemente se utiliza una clasificación que constituye una combinación de los procesos de formación y del tamaño de las partículas, y las distingue en diversas “modas” que se conocen como moda de nucleación, Aitken, de acumulación y gruesa (European Commission, 2004; Environmental Protection Agency, 2009; Department for Environment, 2005), estas modas mayormente se ven influenciadas por vapores que mediante la condensación permiten el aumento de tamaño de las partículas.

En la Figura 6 se pueden observar los promedios mensuales de los tiempos de día y noche de las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ para ambos años donde en general la concentración es mayor para el día, esto se atribuye principalmente al flujo vehicular que es mayor en el día y menor o nulo en la noche.

Los meses de marzo y abril tienen mayores concentraciones de estas partículas, esto se asocia a los frentes fríos propios de estos meses y también a la dirección de viento que proviene mayormente del sur y suroeste con dirección al norte y noreste; y como se observa en la Figura 1 existen más edificaciones al sur y suroeste y algunas dispersiones de servicios que cuentan como fuentes de área. Esto podría explicar el aumento de concentración de contaminantes en estos meses.

También se observa en la Figura 6 que la concentración disminuye en los meses de octubre a diciembre para ambos tiempos. Para observar mejor el comportamiento, se realizaron promedios por hora en cada estación del año.

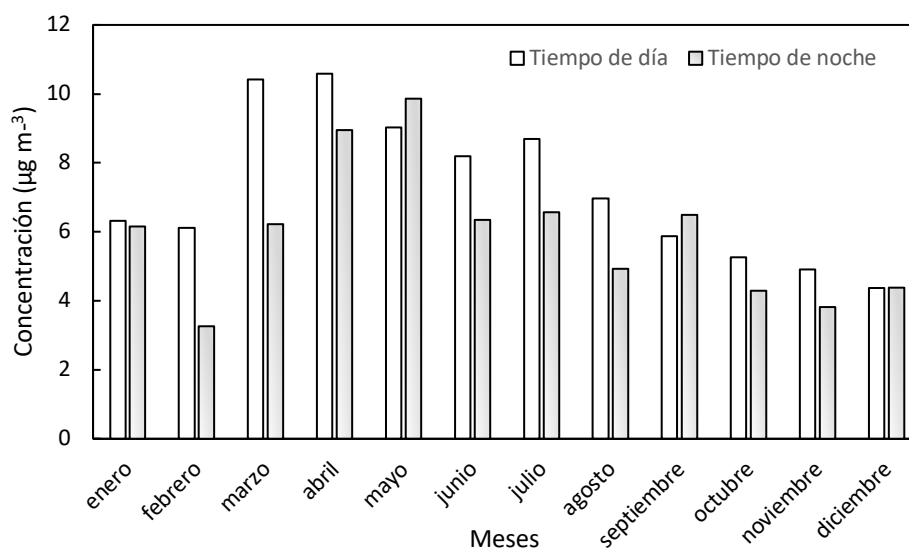


Figura 6. Promedios mensuales en los tiempos de día y noche de concentración de partículas PM_{2.5} en los años 2019-2020.

Observando la Figura 1, donde existe un tipo de estreñimiento por dos cimas alrededor de la estación de monitoreo se podría dar el efecto Venturi, donde considerando que el aire que se aproxima a la obstrucción orográfica se ve obligado a atravesarlo sin poder superarlo por arriba, los vientos que se acercan a la obstrucción son débiles. Debido a la conservación de la masa, la velocidad del aire va acelerándose a medida que va penetrando por la obstrucción y adquiere la máxima velocidad en el punto más estrecho del mismo (*La Orografía y El Viento: Efectos Geográficos*, 2000). Lo cual, relacionando la dirección del viento en marzo y abril (del sudeste y sur) se podría explicar la concentración de partículas en la zona de estudio, ya que fungiría como la zona antes de la formación del embudo. Y teniendo que según estadísticas de los años 2017-2021 de las de la estación meteorológica en Zacatecas/La Bufo (*Estadísticas Del Viento y Del Tiempo Zacatecas/La Bufo - Windfinder*, 2021), se alcanzan velocidades mayores a los 9 m s⁻¹ en esos meses (velocidades casi nulas en la estación de monitoreo). Esto podría explicar la aceleración de la velocidad de viento en esta estación. Sin embargo, estos fenómenos no se pueden asegurar, ya que no se cuenta con suficiente información.

También es importante recalcar que estos son los meses con menor precipitación (CONAGUA, 2018), y según Fonseca y otros (2013), los eventos de lluvia posibilitan el lavado de los contaminantes dando paso al fenómeno denominado deposición húmeda, en donde las sustancias presentes en la atmósfera son arrastradas y vuelven al suelo (Fonseca et al., 2013), al existir poca o nula precipitación en esos meses (marzo y abril), no existe un arrastre de partículas por precipitación. También en el mes de febrero tiene un alto porcentaje de humedad relativa (con un 61%), lo cual da indicio de que en este mes existe un gran proceso de nucleación, donde las partículas pueden hacerse más pesadas y precipitar, ya que la concentración de partículas en febrero es baja respecto a marzo y abril.

En la Figura 7 se puede observar que la estación con mayor concentración de partículas PM_{2.5} es la de primavera seguida de invierno, con concentraciones máximas de 11.73 y 8.17 µg m⁻³, respectivamente. Esto se puede deber a la dirección y velocidad de viento que se toma en esos meses, ya que el viento viene de una zona más edificada, y observando la topografía del lugar se puede favorecer el efecto Venturi, lo que puede provocar una acumulación y/o recirculación a la zona de muestreo de estas partículas por la topografía presentada (Figura 1) y también existe la posible resuspensión de contaminantes debidas a velocidad de viento. También, según García Lozada (2006), los servicios encontrados al ser emisiones al nivel del suelo, los contaminantes tienden a concentrarse (García Lozada, 2006).

Las mayores concentraciones de este mes se encuentran a las 8:00 y entre las 23:00-1:00 horas. En invierno se observa un aumento entre las 8:00 y 9:00 horas, en donde aumenta el flujo vehicular debido a la entrada a los centros de trabajo y observando la Figura 5, la clase A y A-B apenas se hacen presentes, es decir la turbulencia vertical apenas está tomando lugar y, a las 10:00 horas se observa una disminución que continúa hasta las 19:00 horas, que corresponde con el aumento en la frecuencia de la estabilidad A en la Figura 7. Cuando la concentración comienza a aumentar de nuevo, es precisamente donde la clase F toma lugar en la Figura 7. Es decir, en esta estación del año se observa una

relación entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la estabilidad atmosférica. Se puede observar un comportamiento parecido en las otras estaciones de año pero no tan notorio como en invierno.

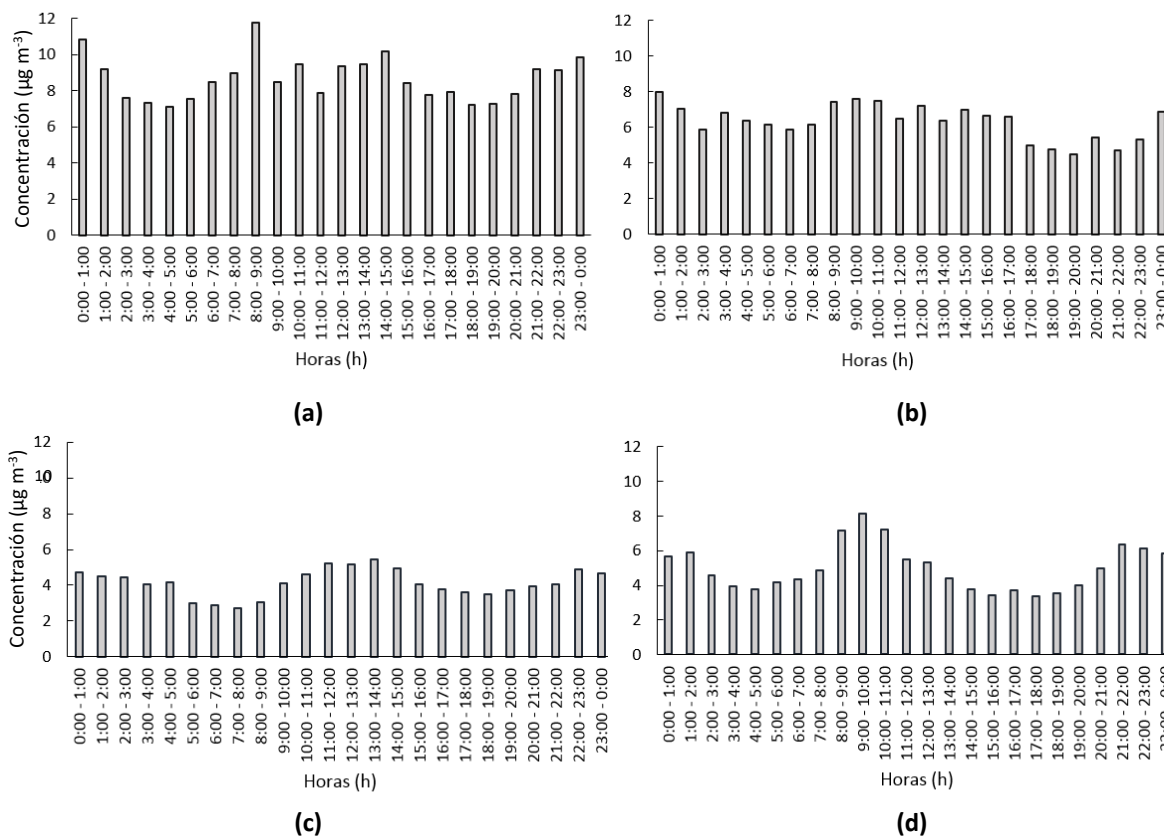


Figura 7. Promedios por hora de partículas $PM_{2.5}$ en las estaciones de los años 2019-2020; a) primavera, b) verano, c) otoño, d) invierno.

Conclusiones

Se estimaron las clases de estabilidad atmosférica horarias usando la clasificación modificada de Pasquill-Gifford para las cuatro estaciones del año y se encontraron frecuencias máximas de la clase A entre las 9:00 y 12:00 horas, considerada la más inestable con valores de 52.22% para la primavera, 53.57% para el verano, 44.87% para el otoño y 40% para el invierno. Esto se asocia directamente con las velocidades de viento y radiación solar particulares de cada estación.

En las noches de invierno y primavera existe una alta frecuencia de la clase F, con un máximo de 80.45% en invierno entre las horas de 18:00-21:00 y en la madrugada entre las horas de 0:00-2:00 de 83.51%, esto se atribuye a la poca nubosidad que existe en esas horas, ya que no existe una barrera de nubes que reduzca el enfriamiento de la superficie por consiguiente, la turbulencia convectiva disminuye drásticamente.

Se determinó que en las estaciones de primavera y verano existe una mayor concentración horaria de partículas $PM_{2.5}$ llegando a tener 11.73 y 7.58 $\mu g m^{-3}$, respectivamente, esto se atribuye a la velocidad, dirección del viento, topografía del lugar, así como la altura de emisión de contaminantes, también que primavera es una época con poca o nula precipitación por lo que no ocurre de manera importante la deposición de partículas, y se pueden mantener más tiempo suspendidas en el aire.

Se observó un comportamiento horario de dispersión de partículas $PM_{2.5}$ relacionado con las clases de estabilidad estimadas, es decir cuando la clase A incrementó, su frecuencia, la concentración de partículas disminuyó y cuando la clase F incrementó, la concentración de partículas aumentó.

Las estaciones de primavera e invierno tuvieron una mayor concentración de partículas PM₁₀ llegando a tener 52.11 y 37.07 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente, esto se atribuye a la velocidad, dirección del viento, topografía del lugar, así como la altura de emisión de contaminantes, también que primavera es una época con poca o nula precipitación por lo que se pueden mantener más tiempo suspendidas en el aire. Y las fluctuaciones horarias de estas partículas se atribuyen al flujo vehicular. Obteniendo que las mayores concentraciones fueron entre las 9:00 y las 16:00 horas.

Los objetivos planteados en el proyecto se cumplieron en su totalidad y se rechaza parcialmente la hipótesis inicial, dado que los meses cálidos (primavera y verano) sí presentaron mayor frecuencia de la clase A considerada como la clase más inestable y con mayor potencial de dispersar partículas, sin embargo existió una mayor concentración de contaminantes en estos meses.

Para futuros estudios en la ciudad de Zacatecas de estos contaminantes se recomienda tomar en cuenta diferentes factores que pueden influir en la dispersión de contaminantes y respecto a los resultados obtenidos, se recomienda hacer uso de esta clasificación solo en promedios horarios.

Para precisar con mayor confianza el comportamiento de partículas en distintos periodos de tiempo la clasificación de Pasquill-Gifford se podría combinar con el uso de modelos atmosféricos.

Bibliografía

- Appendini, C. M., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R., & Kurczyn, J. A. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*, 51(9–10), 3747–3763. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>
- Ashrafi, & Hoshyaripour. (2008). A Model to Determine Atmospheric Stability and its Correlation with CO Concentration. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 2, 8.
- BBCi - Weather Centre - WeatherWise - Weather Station - Cloud. (2003). https://web.archive.org/web/20031208161922/http://www.bbc.co.uk/weather/weatherwise/activities/weatherstation/cloud_measuring.shtml
- Bromberg, P. A. (2016). Mechanisms of the acute effects of inhaled ozone in humans. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1860(12), 2771–2781. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2016.07.015>
- Brunkard, J. M., Cifuentes, E., Rothenberg, S. J., & Jm, B. (n.d.). *Assessing the roles of temperature, precipitation, and ENSO in dengue re-emergence on the Texas-Mexico border region Artemisa medigraphic en línea*. Retrieved April 23, 2021, from http://climvis.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/g sod_xmgr
- Bulhosa, V. M., Funcke, R. P. N., Brum, T., Sanchez, J. S., Lima, Z. R., Vital, H. C., Prah, M., & Andrade, E. R. (2020). Solid cancer risk dependence on the Pasquill–Gifford atmospheric stability classes in a radiological event. *Radiation and Environmental Biophysics*, 59(2), 337–342. <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00840-3>
- Canada, E. C. and H. (2000). Priority Substances List Assessment Report, Respirable Particulate Matter Less Than or Equal to 10 Microns. In *Canadian Environmental Protection*.
- Cecilia Conde. (2011). *México y el Cambio Climático Global*. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico_y_el_cambio_climatico.pdf
- Clima promedio en Zacatecas, México, durante todo el año - Weather Spark. (n.d.). Retrieved April 8, 2021, from <https://es.weatherspark.com/y/4268/Clima-promedio-en-Zacatecas-México-durante-todo-el-año#Sections-Clouds>
- CONAGUA. (2021). *Frentes Fríos*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios>
- Davies, M. E., & Singh, S. (1985). *Thorney Island: its geography and meteorology*. 11((ed.), Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Sci. Publishers B.V., 1985, pp.91-124. (Chem. Engng. Mono), 91–124.
- Department for Environment. (2005). Particulate Matter in the United Kingdom. *Food and Rural Affairs; Scottish Executive; Welsh Assembly Government y Department of the Environment in Northern Ireland*.
- Edokpa, D. O., & Nwagbara, M. O. (2017). Atmospheric Stability Pattern over Port Harcourt. *Journal of Atmospheric Pollution*, 5(1), 9–17. <https://doi.org/10.12691/jap-5-1-2>
- Environmental Protection Agency. (2009). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter. EPA/600/R-*
- EPA. (2017). Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter. *Federal Register*, 82(180), 56928–56935. [https://doi.org/10.1016/0196-335x\(80\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0196-335x(80)90058-8)
- Estadísticas del viento y del tiempo Zacatecas/La Bufo - Windfinder. (n.d.). Retrieved May 29, 2021, from https://es.windfinder.com/windstatistics/zacatecas_la-bufo
- European Commission. (2004). Second Position Paper on Particulate Matter. In *CAFE Working Group on Particulate Matter*.
- Flores, J. (n.d.). *VIENTO Introducción*.
- Gestión de la Calidad del Aire: Causas, Efectos y Soluciones. (n.d.). Retrieved April 15, 2021, from https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/gestion_calidad/Cap07.pdf
- Gómez, F., & Valcarce, J. (2003). Tóxicos detectados en muertes relacionadas con fuegos e intoxicaciones por monóxido de carbono. *Rev. Toxicol.*, 20, 38–42.

- Heat Transfer, Conduction, Convection and Radiation*. (n.d.). Retrieved April 15, 2021, from http://www.biocab.org/heat_transfer.html
- Horner, J. M. (2000). Anthropogenic emissions of carbon monoxide. *Reviews on Environmental Health*, 15(3), 289–298. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2000.15.3.289>
- INECC. (2011). *¿Qué son, cómo son y cómo se originan las partículas?* <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf>
- INEGI. (2000). *Marco Geoestadístico*. https://web.archive.org/web/20050924205802/http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/zac/ubic_geo.cfm
- INEGI. (2020). *Número de habitantes*. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/zac/poblacion/default.aspx?tema=me&e=32>
- Infraestructura Educativa, & Secretaría de Educación Pública. (2015). *Seguridad Estructural* (Vol. 4). https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/normateca/INIFED/03_Normatividad_Técnica/02_Normas_y_Especificaciones_para_Estudios/04_Volumen_4_Seguridad_Estructural/Volumen_4_Tomo_III.pdf
- Kahl, J. D. W., & Chapman, H. L. (2018). Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation. *Atmospheric Environment*, 187(May), 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.058>
- Koren, H. S., Devlin, R. B., Graham, D. E., Mann, R., McGee, M. P., Horstman, D. H., Kozumbo, W. J., Becker, S., House, D. E., McDonnell, W. F., & Bromberg, P. A. (2012). Ozone-induced Inflammation in the Lower Airways of Human Subjects. <http://dx.doi.org/10.1164/Ajrcm/139.2.407>, 407–415. <https://doi.org/10.1164/AJRCM/139.2.407>
- La dispersión de los contaminantes*. (n.d.). Retrieved April 15, 2021, from <https://www.ceupe.com/blog/la-dispersion-de-los-contaminantes.html>
- La orografía y el viento : efectos geográficos*. (2000). 1–24.
- Liverman, D. M., & O'Brien, K. L. (1991). Global warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change*, 1(5), 351–364. [https://doi.org/10.1016/0959-3780\(91\)90002-B](https://doi.org/10.1016/0959-3780(91)90002-B)
- Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R., & Patiño-Gómez, C. (2016a). Temperature and heat wave trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.005>
- Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R., & Patiño-Gómez, C. (2016b). Temperature and heat wave trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.005>
- Martínez, S. (2011). *Las estaciones del año en el Planeta Tierra*. <http://www.juntadeandalucia.es/educacion/descargasrecursos/plc/html/primaria/cuatroest-anexo1.pdf>
- Masamichi, O., Minsik, K., Ryohji, O., & Shinsuke, K. (2018). STUDY ON IMPROVEMENT OF SOURCE INTENSITY ESTIMATION METHOD FOR AIR POLLUTANT. *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, 83(744).
- Mazuela Águila, P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. In *Idesia* (Vol. 31, Issue 2, pp. 3–4). Universidad de Tarapaca. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Met One Instruments, I. (2019). *BAM1020 Continuous Particulate Monitor*. www.metone.com
- Mohan, M., & Siddiqui, T. A. (1998). Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmospheric Environment*, 32(21), 3775–3781. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00109-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00109-5)
- Moragues. (2002). *Clasificación de estabilidad y Capas de Mezcla*. 8.
- Muir, D. M. (2004). *Air Pollution Control Technology*. Department of Chemical and Process Engineering, University of Strathclyde Publications.
- Padilla J., & Torres M. (2012). *La demografía zacatecana a comienzos del Siglo XXI*. Migración y Desarrollo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-75992012000200005
- Pasquill, F. (1974). *Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling, Part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values*.
- Persson, A. O. (2005). The Coriolis Effect: Four centuries of conflict between common sense and mathematics, Part I: A history to 1885. In *History of Meteorology* (Vol. 2).
- Rodríguez, L., & Romero K.J. (2018). ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD Y METEOROLÓGICAS PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO ATMOSFÉRICO EN.
- SAMA, & SEMARNAT. (2018). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Zacatecas 2018-2028. *Programa de Calidad Del Aire Del Estado de Zacatecas 2018-2028*, 257.
- Schenelle, K. ., & Dey, P. R. (2000). Atmospheric dispersion modeling compliance guide. In *McGraw-Hill companies*.
- SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>
- Sistema de Información del Medio Ambiente de México. (2005). *Índice metropolitano de calidad del aire*. <http://www.sima.com.mx/>
- Turner. (1969). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Cincinnati, OH., PHS Public.
- U.S Environmental Protection Agency. (2001). *National air quality 2001 status and trends. Carbon Monoxide*.
- Vázquez García, V., & Sosa Capistrán, D. M. (2019). Seguridad energética e interseccionalidad de género en Zacatecas, México. *Sociedad y Ambiente*, 21, 131–154. <https://doi.org/10.31840/SYA.V0I21.2043>
- Venkatram, A. (1996). An examination of the Pasquill-Gifford-Turner dispersion scheme. *Atmospheric Environment*, 30, 1282–1290.
- Zoras, S., Triantafyllou, A. G., & Deligiorgi, D. (2006). Atmospheric stability and PM10 concentrations at far distance from elevated point sources in complex terrain: Worst-case episode study. *Journal of Environmental Management*, 80(4), 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.010>