

Análisis de Contaminantes $PM_{2,5}$ y PM_{10} y su cumplimiento con las Normativas Nacionales e Internacionales en Nuevo León

Andrés Olvera, Ernesto Godínez, Alejandro Hermosillo, Ana Paula Ponce
A01639918, A01633812, A01634552, A01620477

Angel Javier Valdez Rodríguez, Brenda Ivette García Maya, Cecilia Ramírez Figueroa
Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias - Campus Guadalajara

Abstract—En una época donde el cambio climático es una creciente amenaza para los humanos, y un país donde sus emisiones de contaminantes del aire no muestran un cambio significativo con el paso de los años, este artículo presenta un análisis estadístico y descriptivo de las emisiones de partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} registradas por tres plantas, ubicadas en la zona metropolitana de Monterrey, para saber si es posible alcanzar las normas internacionales de la OMS con respecto a los límites de contaminantes del aire. Los resultados obtenidos demuestran que, a pesar de que no se puedan observar mejoras significativas con el paso de los años, alcanzar dichos límites si es posible.

Index Terms—Contaminantes, Normativas, PM_{10} , $PM_{2,5}$, Plantas de Medición, Nuevo León, emisiones

I. INTRODUCCIÓN

Una idea errónea dentro de la sociedad mexicana es que la Ciudad de México es la ciudad más contaminada del país. Para la sorpresa de muchos, la ciudad más contaminada es Monterrey, la capital industrial actual del norte. El desarrollo de la industria que ha tenido Monterrey y sus municipios cercanos los ha impulsado hacia el protagonismo para la economía mexicana. Debido al crecimiento del estado como sector industrial, la liberación de contaminantes tóxicos en fábricas ha sido una principal causa de preocupación para los habitantes del estado.

En este documento se investigarán las cantidades liberadas de estos gases tóxicos en distintas áreas de la ciudad de Monterrey y se compararán contra las normativas nacionales e internacionales. También se revisará la correlación entre los datos de las distintas estaciones de la zona metropolitana de Nuevo León para saber si todas son necesarias o si existen algunas que recavan los mismos datos. Por último, se analizará la cantidad de contaminantes durante el periodo de cuarentena por COVID-19, en donde se asume que se tuvieron los valores mínimos de emisiones y así saber si es posible lograr los límites establecidos por las normativas internacionales, nacionales y estatales.

II. PROBLEMÁTICA / CONTEXTO

Los principales contaminantes que afectan las condiciones de aire del estado de Nuevo León son $PM_{2,5}$ y PM_{10} , las cuales son partículas de materiales respirables que pueden ser tanto sólidas como líquidas y pueden ser originados tanto antropogénica como naturalmente. Dichas partículas se clasifican por su diámetro, si es menor o igual a 2.5 micrometros se le llamará $PM_{2,5}$ y en su defecto, si es menor o igual a 10 micrometros esta será clasificada como PM_{10} .

Este tipo de partículas son perjudiciales para la salud, siendo de las principales causas de enfermedades respiratorias en el mundo como la bronquitis, incluso estudios recientes demuestran que estas partículas están involucradas en enfermedades cardiovasculares.

Es por esto que existen diversas normativas para evaluar si la concentración de este tipo de partículas en el aire es la adecuada, tanto internacionales, nacionales y estatales dentro del estado de Nuevo León.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) es la principal institución encargada de establecer las normativas internacionales. Es importante mencionar que la OMS considera que el cumplimiento de sus normas puede ser complicado para aquellas regiones con niveles altos de contaminación. Por esta razón, la OMS recomienda el seguimiento de sus "Interim Targets". El seguimiento de estos es un plan incremental para progresar hacia la meta final que establece la OMS. A dicha meta final se le conoce como AQC (Air Quality Control).

Tabla 0.1. Niveles Recomendados y Obgetivos Provisionales para la Calidad del Aire

Contaminante	Tiempo Promedio	Objetivos Provicionales				Nivel de AQG
		1	2	3	4	
$PM_{2.5}, \mu g/m^3$	24-horas	75	50	37.5	25	15
$PM_{10}, \mu g/m^3$	24-horas	150	100	75	50	45

Fig. 1. Normas mundiales, establecidas por la OMS

Respecto a las normativas nacionales, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la institución encargada de establecer las normativas nacionales. En este caso, la normativa de interés para esta investigación es la NOM-025-SSA1-2014, la cual establece los límites permitidos para las partículas a analizar durante esta investigación. Los límites permitidos son los siguientes:

- **Partículas menores a 2.5 micrómetros $PM_{2.5}$:** El límite permitido según la SEMARNAT son $45 \mu g/m^3$.
- **Partículas menores a 10 micrómetros PM_{10} :** El límite permitido según la SEMARNAT son $75 \mu g/m^3$.

En cuanto a las normas estatales, el Índice de Aire y Calidad de Nuevo León establece los límites promedio de las partículas por cada 12 horas:

Índice de Aire y Salud	Nivel de Riesgo	Promedio 12hrs PM_{10}	Promedio 12hrs $PM_{2.5}$
Buena	Bajo	≤ 50	≤ 25
Aceptable	Moderado	>50 y ≤ 75	>25 y ≤ 45
Mala	Alto	>75 y ≤ 155	>45 y ≤ 79
Muy Mala	Muy Alto	>155 y ≤ 235	>79 y ≤ 147
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>236	>147

Fig. 2. Normas estatales, establecidas por el gobierno de Nuevo León

Las plantas analizadas en este artículo fueron las de Obispado (ubicadas en el La Pastora), Santa Catarina (localizada en el Suroeste) y La Pastora (localizada en el Sureste) en la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León.

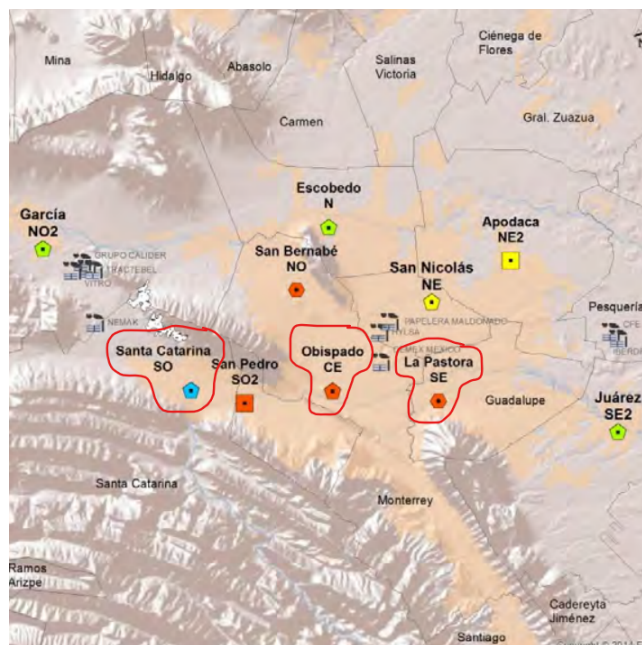


Fig. 3. Ubicación de las plantas analizadas

III. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

El propósito del artículo es investigar el cumplimiento de las emisiones de partículas y gases tóxicos en cada una de las plantas seleccionadas con respecto a las normas nacionales e internacionales. A su vez, se plantean la siguientes preguntas de investigación:

- ¿Se respetan las emisiones límites de las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} indicadas en las normativas estatales, nacionales e internacionales en las plantas del Obispado, Santa Catarina y San Pedro del estado de Nuevo León?
- ¿Cuántos días ha existido una emisión superior al límite indicado?
- ¿Es viable que en algún futuro cercano se llegue a las emisiones ideales de dichos contaminantes en el estado de Nuevo León?
- ¿Son esenciales todas las plantas en la medición de los contaminantes, o algunas llegan a recabar los mismos datos?

IV. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este documento fue estructurada de la siguiente manera:

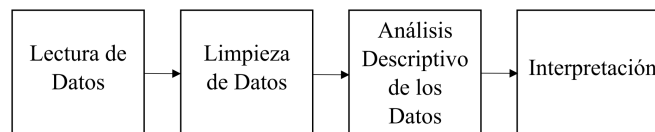


Fig. 4. Diagrama de Flujo de la metodología seguida

Primeramente, el libro de Excel estaba formado por 4 hojas, cada una contenía la información de las

concentraciones de un solo contaminante recabado por las distintas plantas de la zona de Nuevo León. Cada tabla contaba con aproximadamente 40,000 registros para cada contaminante obtenidos por hora desde 2017 hasta 2021. Debido a esto se optó por utilizar Python, donde se leyeron por separado cada una de las hojas del libro de Excel, para así tener los registros de cada contaminante en distintos data frames. Se optó por este lenguaje de programación ya que cuenta con librerías que simplifican el análisis y manejo de las bases de datos.

Al tener los data frames de cada uno de los contaminantes, el siguiente paso fue hacer un análisis descriptivo y estadístico de la información para observar la distribución de cada variable y sus correlaciones. Además, revisar los valores atípicos y limpiar las bases de datos eliminando o inputando valores nulos.

Posteriormente, al revisar los datos nulos, se optó por eliminarlos, ya que debido a la gran cantidad de datos faltantes, si estos se intentaban reemplazar por la media o mediana se crearía una tendencia en los datos que podría afectar el análisis. Por esta misma razón, es que se decidió solamente analizar tres de las veintiséis plantas que habían en total, siendo estas Santa Catarina (SO), La Pastora, (SE) y el Obispado (CE). Al haber realizado la limpieza de las bases de datos, se trabajó con un total de 34926 registros para el contaminante PM_{10} y 20442 registros para el $PM_{2.5}$.

Por otro lado, se realizaron gráficas de cajas y bigotes que fueron requeridas para la revisión de valores atípicos. Si bien es cierto que la base de datos contaba con valores atípicos, estos permanecieron de igual manera ya que estaban dentro de rangos de emisión posibles, es decir no hubieron valores negativos o que fueran imposibles de emitir, como se puede observar a continuación:

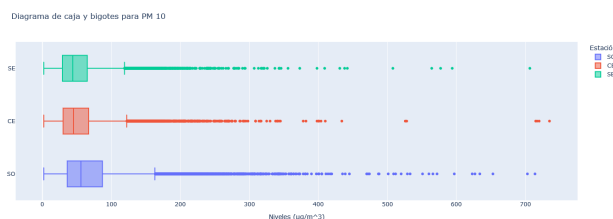


Fig. 5. Box Plot 1. Revisión de datos atípicos para PM_{10}

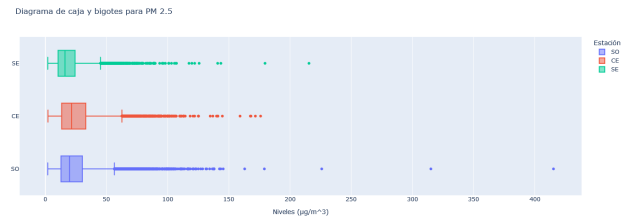
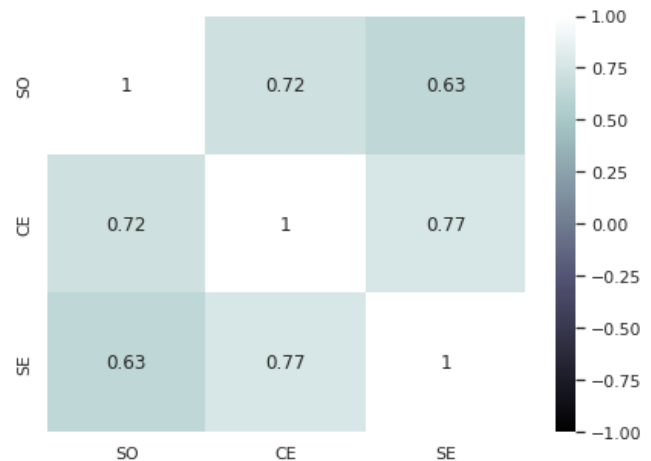


Fig. 6. Box Plot 1. Revisión de datos atípicos para $PM_{2.5}$

Seguido de esto, se generó un correlograma para observar los coeficientes de correlación entre cada una de las variables, cabe recalcar que este último apartado fue de suma importancia para dar respuesta a la interrogativa de si realmente son necesarias todas las plantas para recabar la información de las emisiones.

Correlación de estaciones de $PM_{2.5}$



Correlación de estaciones de PM_{10}

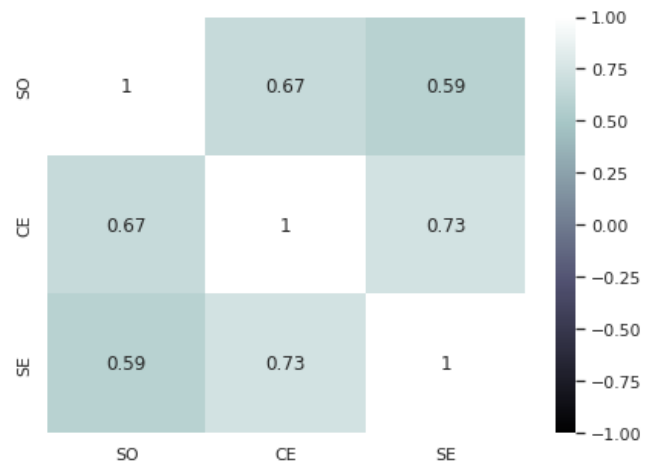


Fig. 7. Correlogramas de los contaminantes por estación

Analizando los correlogramas, se observa que las correlaciones rondan entre un 59% y 77%, siendo cada variable una distinta planta en el estado de Nuevo León.

A pesar de que no son correlaciones débiles, no son los suficientemente fuertes como para afirmar que se puede descartar una de las plantas por su similitud en los registros.

Se prosiguió a graficar los histogramas de los datos para revisar si las variables mostraban un comportamiento normal como se muestra a continuación:



Fig. 8. Histograma de las emisiones de cada contaminante

Revisando los histogramas de cada variable se puede observar un comportamiento normal con un sesgo de los datos hacia la izquierda.

V. ANÁLISIS DE DATOS

Posterior a la preparación y estadística descriptiva de los datos, el siguiente paso era identificar si habían días en los registros en los que las emisiones rebasaran las normativas establecidas nacional e internacionalmente. Para poder realizar este análisis, primeramente era necesario el agrupar a los registros por periodos de 24 horas (días) en lugar de como se tenían inicialmente cada hora.

Posteriormente, aplicando condiciones y límites de emisiones en el código, se hizo un conteo de los días en los que las emisiones de contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$ rebasaran las normativas establecidas y se generaron visualizaciones de los días sobre las normativas mexicanas e internacionales (OMS) cada año.

Primeramente las visualizaciones de días sobre la norma para el contaminante PM_{10} por año :



Fig. 9. Emisiones promedio de PM_{10} que superan los límites permitidos por las normativas mundiales y nacionales al año

Realizando una interpretación de las gráficas anteriores, se observa que el año en el que más se excedieron los días sobre las normativas fue en el 2017 en la planta de Santa Catarina. De igual forma, el año en el que los días sobre la norma tuvieron un decremento significativo fue en el año de 2019 en esta misma planta y teniendo de nuevo un pico en el siguiente año. Por otra parte al revisar las plantas del Obisado y La Pastora, se observa que los días en los que se excedieron las normativas son mucho menores a los de la planta de Santa Catarina.

Si se revisan ambas gráficas por separado, notamos que en todas las plantas el rango de días que se excedieron las normativas de la OMS es mucho mayor al comparado con las normativas mexicanas. Esto debido a que las normativas internacionales son mucho más estrictas que las nacionales.

Ahora las visualizaciones de días sobre la norma para el contaminante $PM_{2.5}$ por año:



Fig. 10. Emisiones promedio de $PM_{2.5}$ que superan los límites permitidos por las normativas mundiales y nacionales al año

Analizando ahora las mismas gráficas pero para el contaminante $PM_{2,5}$, se observa que contrariamente, el año con más días sobre las normativas mexicanas de emisiones fue el 2019 en todas las plantas y para las normativas delimitadas por la OMS fue el año 2020 igualmente en todas las plantas analizadas. En ambas gráficas el periodo con menos días sobre las normativas fue entre 2017 y 2018. De igual forma se observa que los días en los que se infringieron las normativas mexicanas en todas las plantas varían en un rango de entre 2 a 29 días por año, mientras que con respecto a las normativas de la OMS, dichos días varían en un rango mucho mayor de entre 57 a 256 días por año.

Posterior a esto, ahora se agruparon los registros en periodos mensuales, semanales y por hora del día en cada una de las plantas del estado para poder identificar en que periodos de tiempo las emisiones de los contaminantes en el aire se elevan o disminuyen.

Comenzando con el análisis por mes del contaminante PM_{10} :



Fig. 11. Emisiones promedio de PM_{10} por mes

En estas gráficas se puede observar una estacionalidad muy marcada de 2 grandes incrementos para todos los años. El primero sucede a finales de año por otoño (finales de septiembre o inicios de octubre) y este mismo termina a finales de invierno, principios de primavera (finales de febrero, inicios de marzo e incluso de abril). El segundo suele empezar en junio, para todos los años, y suele terminar en agosto. Las mayores emisiones suceden en diciembre cerca de la estación Sur Oeste (SO), estas llegan a ser de hasta 110, en el año de 2020. El mejor año fue 2019, este fue en el que se presentaron los niveles promedio de contaminantes más bajos.

Para el contaminante $PM_{2,5}$ por mes:

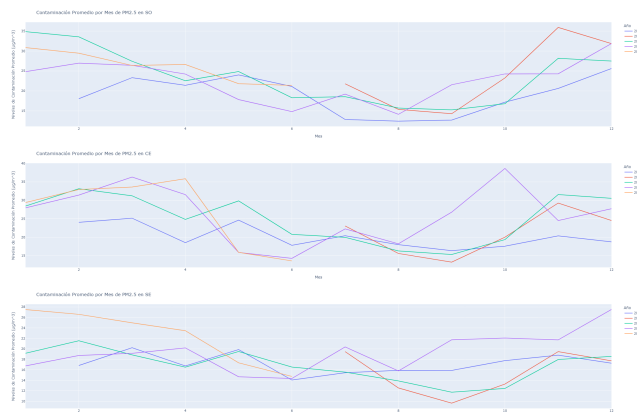


Fig. 12. Emisiones promedio de $PM_{2,5}$ por mes

A diferencia del PM_{10} , aquí se observa un solo incremento, este dura desde agosto o septiembre y termina en mayo o junio. De este contaminante los periodos de mayor emisión son mayores, aunque en promedio son mucho más bajos que las emisiones de PM_{10} por mes.

Prosiguiendo con el análisis por día de la semana para cada uno de los contaminantes PM_{10} y $PM_{2,5}$ respectivamente:

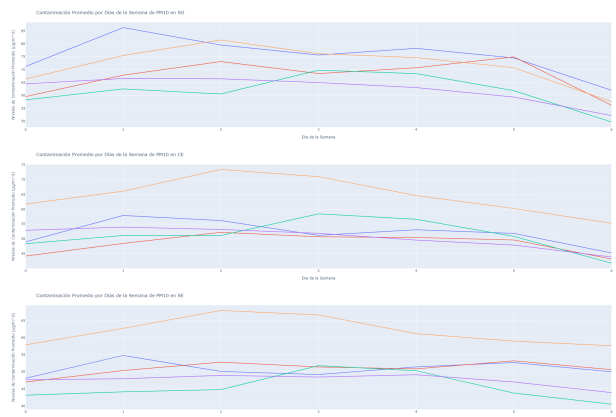


Fig. 13. Emisiones promedio de PM_{10} por día de la semana

Al interpretar las gráficas por día de la semana del contaminante PM_{10} , se observa que en todas las plantas los días con el nivel de contaminación más alto son en promedio a mediados de la semana entre los días martes, miércoles y jueves, mientras que al final e inicio de las semana, el nivel de contaminación va disminuyéndose significativamente.

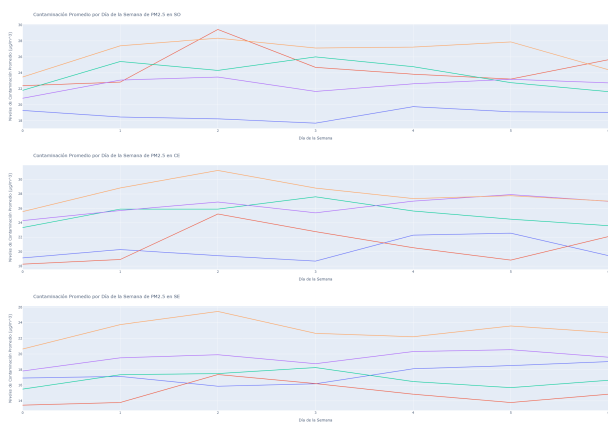


Fig. 14. Emissiones promedio de $PM_{2,5}$ por día de la semana

Con respecto al contaminante $PM_{2,5}$, existe un comportamiento similar en el que en los fines de semana se disminuye el nivel de contaminación y durante la semana dicho nivel incrementa, siendo en promedio el día más alto de la semana el miércoles.

Finalmente el análisis por hora para identificar en promedio las horas del día más contaminadas según los registros.

Para PM_{10} :

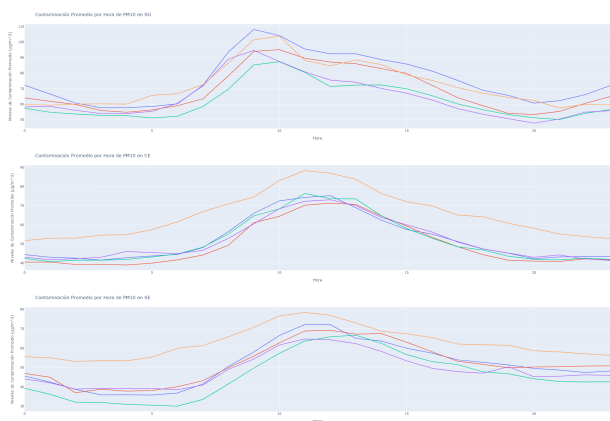


Fig. 15. Emissiones promedio de PM_{10} por hora

Si analizamos las gráficas de las emisiones de PM_{10} por hora se puede observar que a las 5am es cuando empieza el crecimiento de la concentración promedio y esta alcanza su máximo entre las 11am y 1pm. Las emisiones disminuyen por completo hasta las 7pm u 8pm, justo cuando la jornada laboral acaba.

Para $PM_{2,5}$:

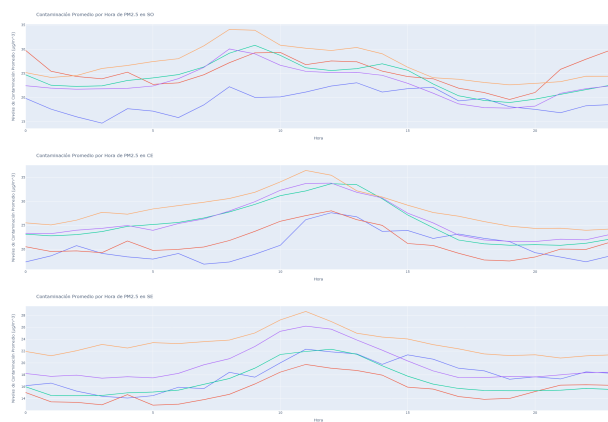


Fig. 16. Emissiones promedio de $PM_{2,5}$ por hora

Por otro lado, observando los gráficos de $PM_{2,5}$ se aprecia que el nivel de contaminación más alto se da a medio día entre las 11 y la 1 de la tarde. Existe un decremento a partir de dichas horas y se mantienen así hasta aproximadamente las 5 am del siguiente día.

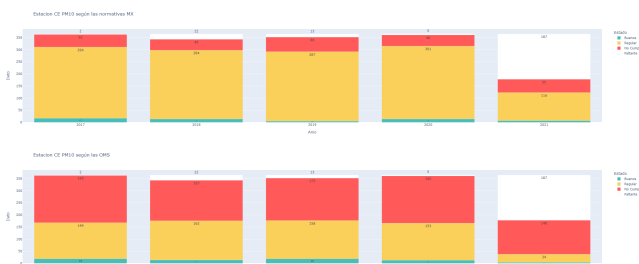
Además de estos gráficos de línea, se realizaron gráficos de barra para poder hacer una comparación visual en cada año, del conteo de días en los que sí se cumplía la norma de emisiones contra los que no, además del conteo de los días donde no se tenía ningún registro. Gracias a estos gráficos también se podía apreciar los días en los que las emisiones de los contaminantes estuvieron cercanas al límite establecido en las normativas, estos se identifican como días regulares en las visualizaciones.

Dichos gráficos de barras se realizaron separando cada planta y con respecto a la normativa mexicana y a la internacional dictada por la OMS.

Para PM_{10} en la planta Santa Catarina (SO):



Para PM_{10} en la planta La Pastora (SE):



Para PM_{10} en la planta del Obispo (CE):

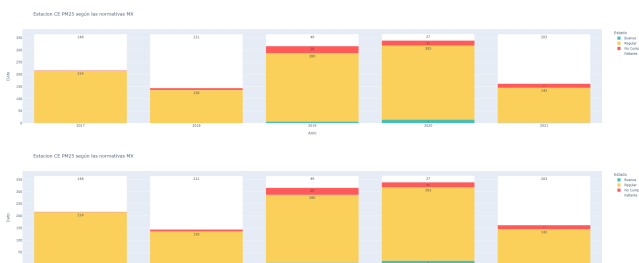


Podemos ver que para las tres plantas, los mayoría de los días sí se cumplen en las normas mexicanas. Se observa que realmente no hay una proporción significativa de días "Buenos" para ninguna estación. En cuanto a las normas de OMS para las tres estaciones, la mayoría de los días exceden las recomendaciones internacionales. Se observa además que en el año 2021 existe una gran cantidad de días con registros faltantes.

Para $PM_{2.5}$ en la planta Santa Catarina (SO):



Para $PM_{2.5}$ en la planta La Pastora (SE):



Para $PM_{2.5}$ en la planta del Obispo (CE):



Para las barras de gráficas de las partículas PM 2.5, podemos ver que para todos los años, hay muy pocos días en los cuales exceden estas normativas. Lo mismo aplica para para las normativas internacionales OMS. Sin embargo, esto no puede afirmarse con tanta certeza pues la cantidad de datos faltantes para este contaminante es significativa.

VI. RESULTADOS

Al haber analizado e interpretado los hallazgos encontrados en las visualizaciones realizadas, se puede decir que los resultados más significativos fueron:

1. El análisis de correlación realizado entre las variables de las plantas del estado, demuestra que en efecto sí son necesarias cada una de las plantas analizadas y no se puede decir que existe una que recabe exactamente los mismos datos.
2. El número de días en los que se infringen las normativas mexicanas para ambos contaminantes es mucho menor a los días en los que se infringen las normativas marcadas por la OMS.
3. Para el contaminante PM_{10} el año con mayor contaminación en promedio fue el año 2017 y el año con menor contaminación el 2019 según las normativas mexicanas y de la OMS.
4. Para el contaminante $PM_{2.5}$ el periodo con mayor contaminación en promedio fue entre el año 2019 y 2020 y el periodo con menos contaminación fue entre el 2017 y 2018 según las normativas mexicanas y de la OMS.
5. Para el PM_{10} los meses con mayor contaminación inician en el otoño y terminan en el invierno de cada año, y existe un segundo pico entre los meses de junio y agosto de cada año.
6. Para el $PM_{2.5}$ los meses más contaminados comienzan en promedio en agosto y terminan en mayo de cada año. Las emisiones de este contaminante rebasan a las emisiones del PM_{10} en varias ocasiones, sin embargo el promedio anual de emisiones es mucho menor a las emisiones generadas por PM_{10}
7. En ambos contaminantes las emisiones se encuentran sus puntos más altos en el transcurso de la semana y disminuyen al final de esta durante los días viernes, sábado y domingo.

8. Para ambos contaminantes las horas de emisión más fuertes son a medio día entre las 11 y la 1 de la tarde y disminuyen conforme va terminando la jornada laboral entre las 7 y las 8 pm.
9. Respecto al análisis de los días sobre y bajo la norma para el contaminante PM_{10} , se observa que en su mayoría los días acatan las normativas mexicanas pero se acercan mucho al límite de estas, y contrariamente para las normativas establecidas por la OMS, la mayor parte de los días al año, las emisiones superan los límites.
10. Para el contaminante $PM_{2.5}$, es difícil sacar conclusiones provechosas debido a la gran cantidad de datos faltantes en la mayoría de los periodos, sin embargo, parece que en su mayoría las emisiones de este contaminante acatan ambas normativas cerca del límite tanto las mexicanas como las internacionales.

VII. CONCLUSIONES

Respondiendo a las preguntas de investigación planteadas, las emisiones de PM_{10} se encuentran dentro de los objetivos provisionales 2 y 3, por lo que estas partículas no cumplen con los límites mundiales ideales, por otro lado las partículas de $PM_{2.5}$ si bien están dentro de los límites provisionales 1 y 2 tampoco cumple con las normativas ideales.

Los días cuando las emisiones de $PM_{2.5}$ superaron los límites mexicanos actuales en los últimos 5 años fueron 153 días y para las normativas internacionales fueron 2,420 días, se puede observar como el cambio entre uno y otro es de 16 veces. Mientras que los días en los que las emisiones de PM_{10} superaron las normas nacionales fueron 1,010 días y para las normativas internacionales fueron 2,900 días.

Es posible que Nuevo León llegue a estar por debajo de las normativas internacionales ya que dentro de los límites provisionales no se encuentra en el peor estado, mas sin embargo para lograrlo va a requerir de tiempo, no es algo que se pueda lograr en los próximos 2 años.

Por último, se puede concluir que todas las plantas, al menos las 3 analizadas, son esenciales para el registro de contaminantes en la zona metropolitana de Monterrey, esto debido a la correlación observada de los datos con respecto a cada planta.

REFERENCES

- [1] [Online]. Available: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/5-dangerous-pollutants-youre-breathing-every-day#:~:text=Nitrogen%20oxides%20are%20a%20group,of%20fuel%20engines%20and%20industry>
- [2] [Online]. Available: <https://www.iqair.com/us/blog/health-and-wellness/10-most-harmful-air-pollutants>
- [3] "Aire nl.gob.mx," *Mapa Calidad del Aire*. [Online]. Available: http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html
- [4] S. d. D. S. Gobierno del Estado de Nuevo León, "Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de nuevo león," 2016. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250974/ProAire_Nuevo_Leon.pdf

- [5] W. H. Organization, "Who global air quality guidelines, particulate matter (pm 2.5 and pm 10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," 2021. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>