

# Aplicación del modelo de dispersión gaussiano para estimar la distribución de contaminantes atmosféricos generados por fuentes antropogénicas fijas ubicadas en el sector industrial de puerto interior, Silao, Guanajuato y proponer medidas de control

Aguilera Pizano, Andrea Michelle<sup>1</sup>, Cruz Aguilar, Montserrat<sup>1</sup>, Hernández Bustos, Diana Ailed<sup>1</sup>, Ojeda Paredes, Anette Paulina<sup>1</sup>, Ramírez Rangel, Juliette Fernanda<sup>2</sup>, Villalpando Vargas, Omar<sup>1</sup>, Zapien Gómez, Jovana<sup>1</sup>, Vázquez Núñez, Édgar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica; División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato. Dirección de correo electrónico: am.aguilera@ugto.mx; m.cruzaguilar@ugto.mx; da.hernandezbustos@ugto.mx; ap.ojedaparedes@ugto.mx; o.villalpandovargas@ugto.mx; j.zapiengomez@ugto.mx; edgar.vazquez@ugto.mx

<sup>2</sup>Bachillerato Bivalente, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: jf.ramirez.rangel@ugto.mx

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo aplicar el modelo gaussiano para determinar cómo se distribuyen los contaminantes atmosféricos el contaminante atmosférico de efecto invernadero CO<sub>2</sub> emitidos por las empresas que se encuentran en la zona industrial de Puerto Interior ubicado entre la ciudad de León y Silao de la Victoria, Guanajuato para estimar las concentraciones que llegan de este contaminante en un radio de aproximadamente 40 km de la fuente fija, considerando ciertos parámetros meteorológicos, para así proponer medidas de control para estos contaminantes.

Para el desarrollo de esta investigación, se sugirió la ubicación de una chimenea perteneciente a un clúster industrial ubicada en 345 Cto. Mexiamora, Col. Puerto Interior, 36275 Silao, Gto., Mexico. Se observó una clara diferencia en el perfil de concentración de CO<sub>2</sub> para todos los trimestres de 2019 y 2020 debido a la variación de los parámetros meteorológicos de estos años a su vez se observó que a los 3.9 km se alcanza la máxima dispersión del contaminante.

**Palabras clave:** Modelo gaussiano, contaminantes atmosféricos, medidas de control, emisión, parámetros meteorológicos.

## Abstract

The present work aims to apply the Gaussian model to determine how atmospheric pollutants are distributed, the greenhouse effect atmospheric pollutant CO<sub>2</sub> emitted by companies located in the industrial zone of Puerto Interior located between the city of León and Silao de la Victoria, Guanajuato to estimate the concentrations that come from this pollutant in a radius of approximately 40 km from the fixed source, considering certain meteorological parameters, in order to propose control measures for these pollutants. In order to carry out this research, was hypothesized the location of a chimney belonging to an industrial cluster located at 345 Cto. Mexiamora, Col. Puerto Interior, 36275 Silao, Gto., Mexico. A clear difference was observed in the CO<sub>2</sub> concentration profile for all the quarters of 2019 and 2020 due to the variation of the meteorological parameters of these years, in turn, it was observed that at 3.9 km the maximum dispersion of the pollutant is reached.

## Introducción

La contaminación atmosférica es un problema grave, y de interés común, se define como la alteración del aire causada por las actividades del hombre, por ejemplo, los gases que expulsan los automóviles, ciertas industrias, incendios y quemas forestales, desechos industriales y domésticos principalmente. La demanda de energía y la combustión, así como el crecimiento de la población y la demanda industrial, han intensificado fuertemente la contaminación del aire, principalmente en el medio urbano y en los corredores industriales (Echeverri Londoño, C. A. 2019)

La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura. (Ballesteros, H. B, 2007)

El dióxido de carbono forma parte de la naturaleza, se encuentra de forma natural en el aire ambiente dependiendo del medio a concentraciones que varían entre 300-500 ppm. El exceso de este compuesto en la atmósfera propicia el calentamiento global. ("Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>," 2017)

Según *The United States Environmental Protection Agency* (EPA), se tiene que el 65% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero a la atmósfera corresponde a CO<sub>2</sub> liberado en quema de combustibles fósiles y procesos industriales [D4]. En el sector económico, el sector industrial a nivel mundial tiene una emisión de hasta 21% de CO<sub>2</sub> emitido.

El modelo de dispersión que se utiliza en este proyecto es el modelo matemático gaussiano, que analiza la dispersión de los contaminantes y su transporte en la atmósfera mediante ecuaciones de dispersión gaussiana. Se caracteriza por enfocarse principalmente en los niveles de inmisión en un área determinada con la cantidad de contaminantes vertidos a la atmósfera desde la fuente emisora, considerando las condiciones de la chimenea, así como la concentración de los gases y las características climáticas del medio receptor. Los factores climatológicos como la temperatura, el viento, la humedad y las precipitaciones modifican la distribución del contaminante. Se sabe que el viento es un factor muy importante en la distribución de los contaminantes y la humedad lo que ocasiona una dispersión negativa de éstos, de humos y polvos (Damaso, J., 2020)

Existen tres tipos de modelos gaussianos de dispersión. En tres dimensiones utilizado cuando existe un vertido esporádico o instantáneo. En dos dimensiones se utiliza si el vertido es continuado en el tiempo. Este es el caso más común, correspondiente a una emisión constante de gases desde la chimenea de una industria. En una dimensión, se emplea cuando hay que tener en cuenta, de forma aproximada, el efecto de la altura de mezclado (Universidad Pablo de Olavide)

## Materiales y métodos

Las ecuaciones que se utilizan en el modelo de dispersión gaussiano son las siguientes:

- Para calcular la altura efectiva de la chimenea, se utilizan las Ec. 1 y 2, ya que antes de que un gas comience a dispersarse al salir de la chimenea, sufrirá una elevación debido a que éste en teoría debe ser menos denso que el aire del ambiente (lo cual depende de la temperatura y la velocidad a la cual sale). Para calcular esta distancia de elevación del penacho denominada ( $\Delta H$ ; en m), se consideran otros factores, como: la velocidad de salida de los contaminantes de la chimenea ( $v_s$ ; en m/s), la velocidad del viento ( $u$ ; en m/s), el diámetro de la chimenea de emisión ( $d$ , en m), la presión ( $P$ , en kPa), la temperatura a la cual salen los contaminantes ( $T_s$ ; en K) y la temperatura ambiente ( $T_A$ , en K). Finalmente, la altura efectiva se calculando sumando esta  $\Delta H$  a la altura física de la chimenea  $H$ .

$$\Delta H = \frac{v_s d}{u} \left[ 1.5 + \left( 2.68 \times 10^{-2} (P) \left( \frac{T_s - T_A}{T_s} \right) d \right) \right] \quad \text{Ec. 1}$$

$$H = h + \Delta h \quad \text{Ec. 2}$$

- El cálculo de la concentración del contaminante atmosférico en tres dimensiones ( $X$ , en  $\text{g}/\text{m}^3$ ) se indica en la Ec. 3, en donde se debe considerar: el gasto de la emisión del contaminante ( $E$ , en  $\text{g}/\text{s}$ ), la velocidad del viento ( $u$ , en  $\text{m}/\text{s}$ ), el margen de dispersión en el eje “y” ( $y$ , en  $\text{m}$ ), los coeficientes de dispersión turbulenta que dependen de la clase de estabilidad de Pasquill (Manzur, M. E, 2011) y de la distancia a la fuente de emisión ( $\sigma_y, \sigma_z$  en  $\text{m}$ ), la altura efectiva de la chimenea ( $H$ ).

$$X = \left[ \frac{E}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \right] \left[ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right] \left[ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right] \quad \text{Ec. 3}$$

La estimación del perfil de distribución de contaminantes se ejecutó de la siguiente manera:

- Adquisición de datos meteorológicos. Los datos meteorológicos empleados para el cálculo de la dispersión empleando un modelo gaussiano i.e., temperatura ambiente (K), presión (kPa), velocidad del viento a 10 m de altura (m/s), insolación solar entrante promedio por día durante los años 2019-2020 se recuperaron de las siguientes fuentes: base de datos de Meteored (Mereored, 2021), de NASA POWER (Stackhouse, 2021) y de Visual *Crossing Weather* (“*Weather Data Services | Visual Crossing*,” 2021).
- Suposición de parámetros de chimenea de estudio. Se consultaron datos sobre la altura física (m), el gasto (g/s), la temperatura (K) y velocidad (m/s) de emisión del contaminante de chimeneas industriales desde las siguientes referencias: la plataforma de la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato (SMAOT) (Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial, 2013), y Norma Mexicana NMX-AA-107-1988.
- Evaluación de la estimación del perfil de contaminantes por medio de un modelo gaussiano tomando valores promedio por trimestre para los años 2019 y 2020 a diferentes radios de distancia desde la fuente tomando valores desde 1.0 km hasta 35.0 km. Los datos de alimentación que se emplearon para dicho modelo matemático corresponden a los presentados en los incisos a) y b); suponiendo la ubicación de una chimenea en Puerto Industrial, Silao, Guanajuato, México. Para la aplicación y resolución de las ecuaciones del modelo de dispersión gaussiano (ec. 1, 2 y 3) se empleó el lenguaje de programación Python. Por otra parte, la estimación de los valores de estabilidad de Pasquill (Manzur, M. E, 2011) se hicieron en función de la velocidad del viento y de la insolación solar entrante promedio por trimestre. También para el análisis se utilizó un margen de 500 m en el eje “y” desde la fuente de emisión.
- Análisis del alcance del perfil de distribución del contaminante a diferentes radios de distancia desde la fuente fija (de 1.0-35.0 km), empleando los resultados de la dispersión calculada con modelo gaussiano y la predominancia de la dirección del viento durante los años 2019-2020, dato obtenido de *Visual Crossing Weather* (“*Weather Data Services | Visual Crossing*,” 2021). Las mediciones de las distancias se realizaron con la edición del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2021), las gráficas de rosas de los vientos de frecuencias con software WRPlot y, finalmente, las gráficas con mapa satelital se hicieron con Google Earth. Lo anterior, permitió hacer el análisis de las localidades y municipios más afectados por la descarga de  $\text{CO}_2$  desde la chimenea de estudio.
- Realización de un análisis estadístico de varianzas (modelo Anova) para determinar la diferencia existente entre los perfiles de distribución del contaminante atmosférico por trimestre tanto para el 2019 como para el 2020 en el punto máximo determinado i.e., 3.9 km a partir del origen de emisión, utilizando un margen de confiabilidad del 95%. El cálculo se hizo siguiendo un modelo de Anovas empleando el software Minitab.

- f) Proposición de medidas de control para reducir las emisiones de los contaminantes atmosféricos y optimizar los procesos dentro de las industrias, dependiendo del tipo de contaminante que descargan con la intención de disminuir el impacto ambiental.

### Objetivo y Alcance

El objetivo de este proyecto es la aplicación del modelo de dispersión gaussiano para determinar el perfil de dispersión que tuvieron los contaminantes atmosféricos descargados por una chimenea ubicada en Puerto Interior, Silao de la Victoria, Guanajuato durante los años 2019 y 2020; para estimar las concentraciones que llegan de estos contaminantes en radios que van de 1.0–35.0 km desde la fuente fija y de esta forma, determinar el impacto que éstos tienen sobre ciertas localidades, considerando ciertos parámetros meteorológicos y de la chimenea. A partir de esto, se proponen medidas de control para disminuir las emisiones de los contaminantes atmosféricos de fuentes fijas pertenecientes al sector industrial.

### Análisis de Inventario y Condiciones de Ejecución de Análisis

Para el desarrollo de esta investigación, se sugirió la ubicación de una chimenea perteneciente a un clúster industrial ubicada en 345 Cto. Mexiamora, Col. Puerto Interior, 36275 Silao, Gto., Mexico; con coordenadas: 21.01845, -101.493486. La descarga del contaminante, en este caso únicamente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se supuso de 10, 473, 391.09 kg/año [SMAOT], tomando en cuenta las emisiones registradas por varias empresas de Puerto Interior ante la SMAOT. Además, se consideró que dicha emisión de contaminante se realizaba las 24 hrs los 365 días del año. Comparando algunos datos obtenidas por varias empresas en Puerto Interior, se le designó a la chimenea de estudio una altura y diámetro de 20 m y 0.85 m, respectivamente; una temperatura de salida del contaminante de 300 °C; y una velocidad de emisión de 6.60 m/s considerando los parámetros que indica la Norma Mexicana NMX-AA-107-1988 sobre calidad de aire para evitar “un abatimiento de la pluma (fumigación) viento abajo de la chimenea o una pérdida del efecto de convección y disminución del ascenso de la pluma” [4]. Para el cálculo se empleó un margen de 500 m en el eje “y” de la campana gaussiana, y un margen de confiabilidad del 95% para realizar la estadística de los resultados por medio de un análisis de Anovas. Por lo tanto, con estos parámetros de la chimenea, junto con los atmosféricos obtenidos de bases de datos, se obtuvieron los siguientes resultados.

### Resultados y discusión

La gráfica 1 muestra la estimación de la dispersión trimestral de  $\text{CO}_2$  para los años 2019 y 2020 a diferentes radios en km desde la fuente fija, ubicada en Puerto Interior desde 1.0 hasta los 35.0 km.

Se observó una clara diferencia en el perfil de concentración de  $\text{CO}_2$  para todos los trimestres de 2019 y 2020 debido a la variación de los parámetros meteorológicos de estos años, obteniéndose que en 2019 (gráfica a) el contaminante tuviera una mayor concentración de alcance para los trimestres julio–septiembre y octubre–diciembre en comparación con los de 2020 (gráfica b). Por su parte, el 2do trimestre permaneció casi igual para los dos años, mientras que el 1er trimestre tuvo la diferencia más significativa debido a la velocidad del viento y a la insolación solar entrante registrada para el periodo de estudio, i.e., 3.47 m/s e insolación fuerte para 2019 y 3.89 m/s e insolación moderada para 2020. Como resultado de esta variación en estos dos parámetros, se obtuvo que este trimestre en 2019 se caracterizara por tener una estabilidad de Pasquill de tipo B, diferente a la estabilidad C de todos los demás trimestres de 2019 y 2020.

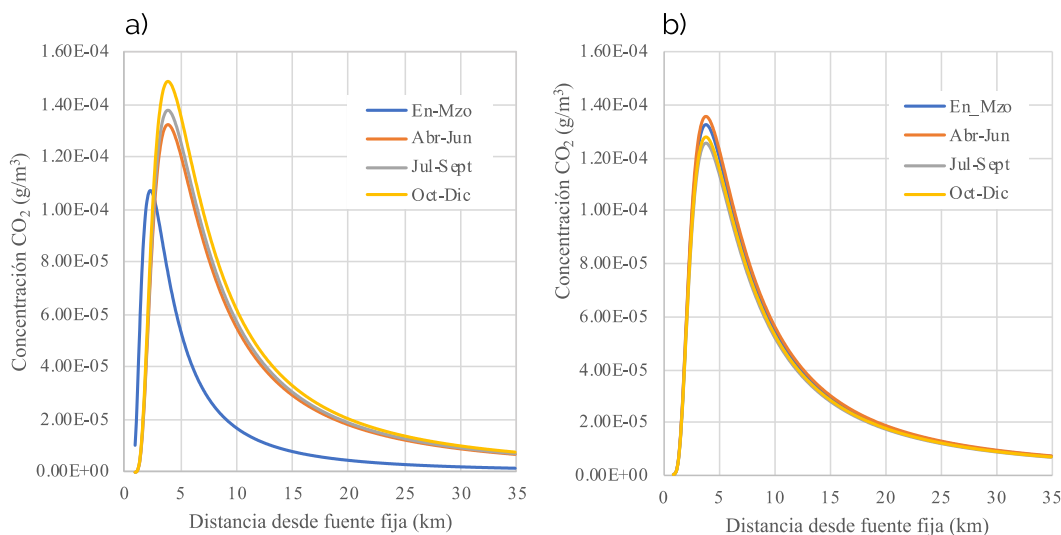


Figura 1. Dispersión del contaminante CO<sub>2</sub> desde fuente fija en Puerto Interior a diferentes radios en km durante los años a) 2019 y b) 2020.

Por otro lado, se puede apreciar que aproximadamente a los 3.9 km se alcanza la máxima dispersión del contaminante para todos los trimestres de 2019 y 2020, a excepción del 1er trimestre de 2019, que al tener una diferente estabilidad de Pasquill, alcanzara su máximo valor a un radio menor de aproximadamente 2.40 km con una concentración, también menor, de  $1.07 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ . Además, a partir de los 20 km se puede considerar como no relevante el impacto ambiental de la concentración de CO<sub>2</sub> para ambos años, ya que este valor está muy por debajo de la mitad de los valores promedio de las concentraciones máximas alcanzadas en cada trimestre.

También se observa que, en 2020 las variables meteorológicas fueron muy parecidas entre sí, dando lugar a perfiles de dispersión con comportamientos muy similares como lo muestra la gráfica b). Para evaluar el grado de semejanza entre los perfiles de dispersión de los trimestres de dicho año, se realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) con los datos obtenidos para las concentraciones máximas resultantes a 3.9 km. Los resultados fueron los siguientes: se obtuvo un nivel de significancia de  $p=0.003$  para la comparación entre el 1er y 2do trimestre y entre el 1ro y 3ro; uno de  $p=0.524$  para el 3ro y 4to trimestre; otro de  $p=0.007$  entre el 1ro y 4to; y un  $p=0.000$  para las demás combinaciones posibles de comparación trimestral. Debido a que el margen de confiabilidad empleado fue del 95%, se concluye que sólo los trimestres julio-septiembre y octubre-diciembre tuvieron prácticamente el mismo perfil de dispersión de contaminante, debido que presentaron valores de  $p > 0.050$ . Y, por el contrario, el perfil fue significativamente diferente para los demás trimestres (1 y 2, 2 y 3, 1 y 4, etc.) debido a que su  $p < 0.05$ . Por su parte, con el análisis de dispersión se pudo comprobar que todos los trimestres del 2019 tuvieron una dispersión diferente entre sí, obteniéndose valores de  $p=0.000 < 0.050$  para todas las comparaciones trimestrales.

Para poder hacer un análisis sobre el impacto de la contaminación atmosférica, la figura II en la siguiente página, muestra la dispersión del CO<sub>2</sub> durante el trimestre octubre-diciembre descargado por la chimenea ubicada en Puerto Interior presentando la información por medio de su concentración en unidades de g/m<sup>3</sup> a diferentes radios de distancia para los dos años de estudio (2019-2020), indicando de forma explícita las localidades y municipios que están expuestas a dicha contaminación.

Al igual que en la figura I, en esta imagen se observa que en la región menor o igual a 5 km desde la fuente de emisión se tiene la mayor concentración del contaminante que resulta tener un valor de  $1.37 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$  para 2019 y  $1.16 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$  para 2020. También se puede apreciar que, en el año 2019, este trimestre tuvo mayor dispersión de contaminante que en 2020. El perfil de dispersión a partir de los 5 km, empieza a disminuir considerablemente hasta alcanzar un valor



no relevante a partir de los 20 km, en donde la concentración es aproximadamente 6.6 veces más pequeña que a los 5 km para los dos años.

Para poder determinar las localidades más expuestas a la contaminación atmosférica de Puerto Interior, es necesario considerar también la dirección hacia dónde se dirigió el viento durante el periodo de estudio y la frecuencia de ocurrencia de la misma. Lo anterior, se presenta en la figura III de la siguiente página en donde se puede apreciar la versatilidad que tiene la dirección y la velocidad del viento para una región específica, de modo que, aunque las velocidades para ambos años se mantuvieron entre 2.10–5.70 m/s (regiones amarillas y azules) para la mayoría de los días, la dirección fue variante, por lo que se obtuvo que, en 2019, la contaminación no alcanzó a afectar la ciudad de León de forma significativa, mientras que en 2020 sí lo hizo, abarcando más de la mitad de la ciudad. De forma directa se identifica que en 2019 la predominancia de la dirección del viento fue el noreste, mientras que, en 2020, fue el norte y el noroeste. Ambas gráficas tienen en común que el viento no se dirigió de forma significativa hacia el sur ni el este, por lo que la contaminación atmosférica no llegó a afectar los centros urbanos de Silao, Guanajuato ni Romita.

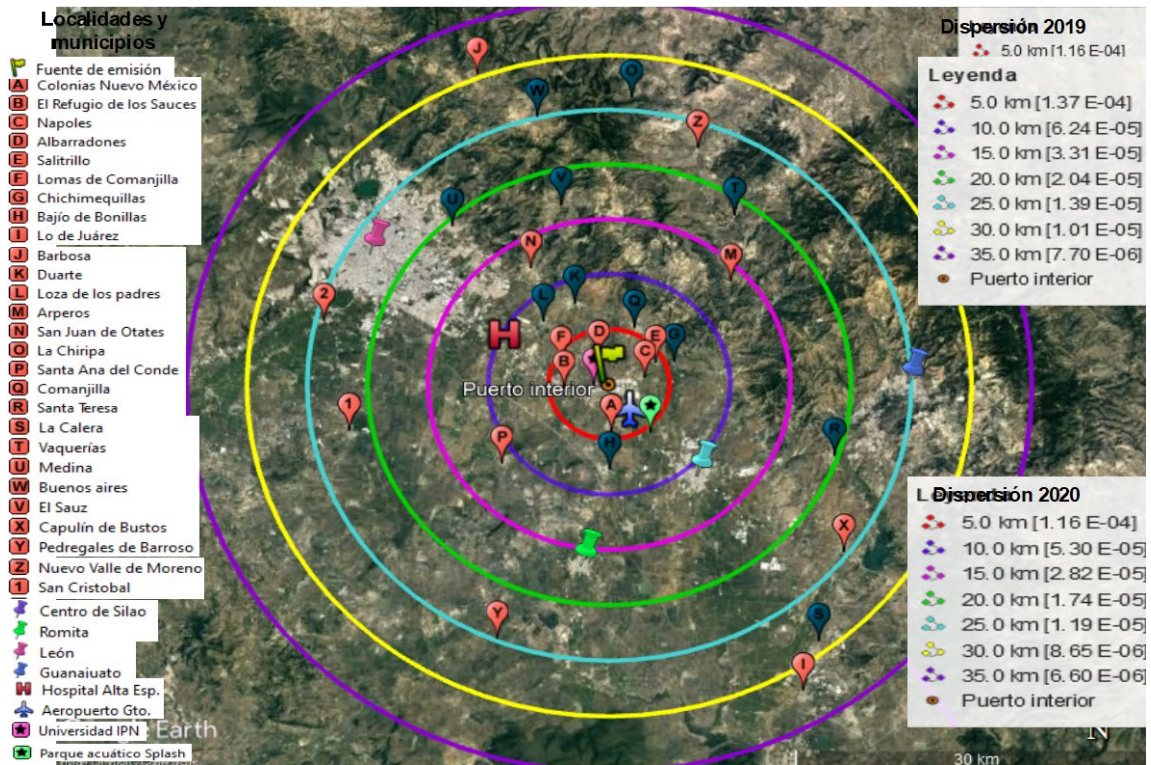


Figura 2. Mapa de la dispersión del contaminante CO<sub>2</sub> desde fuente fija en Puerto Interior a diferentes radios durante 2019 y 2020 para el trimestre Oct-Dic.

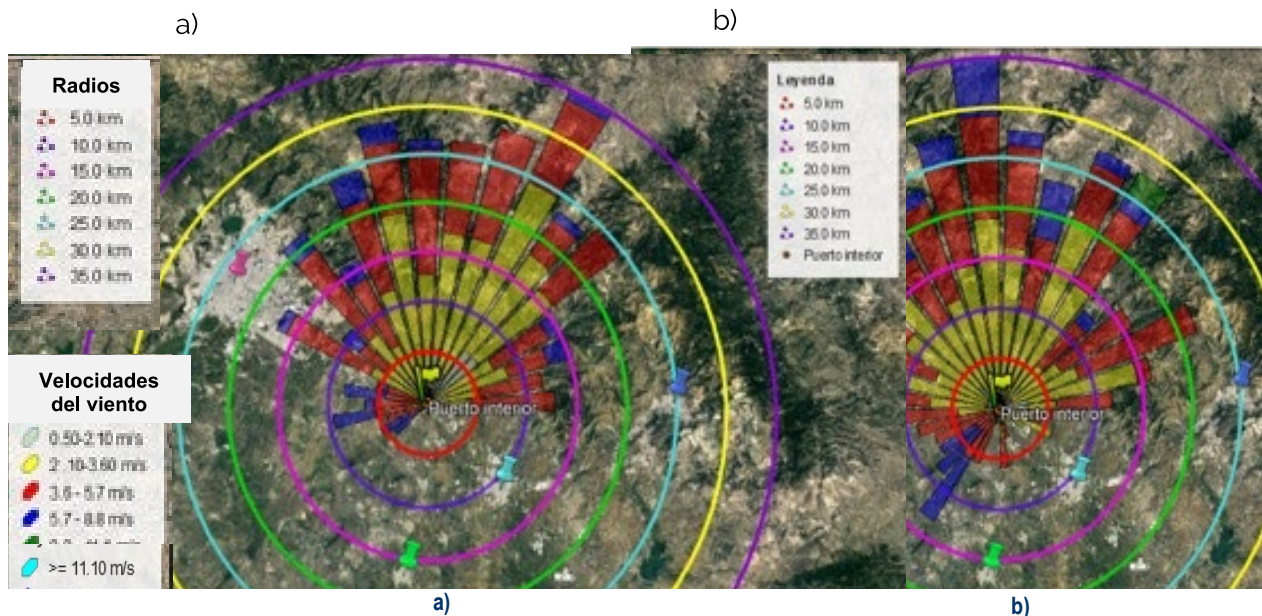


Figura 3. Dirección del viento hacia donde se dirigió desde fuente de emisión durante los años a) 2019 y b) 2020

Por lo tanto, de las figuras 2 y 3, se obtiene que las localidades que fueron mayormente afectadas por la contaminación fueron aquellas que se encontraban en un radio menor a 10 km desde la ubicación de la chimenea y en dirección del paso del viento, las cuales pertenecen al municipio de León o de Silao. Durante el 2019 y 2020, algunas de dichas localidades fueron: El Refugio de los Sauces, Napoles, Salitrillo, Albarradones, Lomas de Comanjilla, Chichimequillas, La Loza de los Padres, Duarte y Comanjilla. De igual manera, fueron afectadas las instalaciones de la Universidad IPN Guanajuato, el Aeropuerto Internacional de Guanajuato, el Hospital de Alta Especialidad del Bajío y el Parque acuático Splash. Las que tuvieron un impacto moderado fueron las localidades en un radio entre los 10 y 20 km de distancia: San Juan de Otates, El Sauz, Vaquerías y Medina. Finalmente, aquellas que, aunque se ubican en zonas por donde el viento sopló, no tuvieron gran efecto por la concentración de contaminante que les llegó (menor a  $2.04E-05$  g/m<sup>3</sup> en 2019 y a  $1.74E-05$  g/m<sup>3</sup> en 2020), fueron las localidades de: Nuevo Valle de Moreno y Buenos Aires. Cabe mencionar que Buenos Aires junto con Vaquerías, y La Chirapa, ubicadas en la región de la Sierra de Guanajuato están casi totalmente despobladas. No obstante, aunque esta contaminación no afecta a poblaciones, sí llega a tener un impacto sobre la vegetación y fauna de la zona.

Para disminuir este impacto ambiental por emisión de contaminantes atmosféricos (ya sea de tipo efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> estudiado o no), se proponen las siguientes medidas de control presentadas en la Tabla 1. Según la literatura, para actividades industriales, por ejemplo, de fundición de metales no ferrosos se sugiere la implementación de las siguientes tecnologías:

Tabla 1. Medidas de control para operaciones unitarias de un proceso industrial.

Proceso industrial	Gases emitidos	Tecnología sugerida	Referencias
Horno de combustión (crisol)	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), metales, material particulado, óxidos de azufre, humos inorgánicos y dioxinas.	Horno de ahorro de energía (su estructura de cámara doble consiste en un puente de fusión y un baño mantenedor separado, con sistemas de quemadores separados y distintos, limita la formación de óxido y escoria, disminuye el riesgo de contaminantes insolubles suspendidos, lo que garantiza un alto rendimiento de metal de alta calidad).  Horno dosificador de aluminio (sistema de mantenimiento y dosificación limpio y cerrado para aluminio líquido, reduce los desperdicios, el consumo de energía, es fácil de instalar, integrar y mantener, alivia la presión en recursos de fundición y genera más piezas de calidad fundidas).	(Norican Group, 2020).
Colectores de polvo	Polvo (sílice), partículas no metálicas, óxido metálico y hierro metálico.	Colector de polvo de aire inverso de manga plana FS (sistema de filtro compacto y eficiente tecnología de limpieza de aire inteligente, ideal para cargas de polvo altas formadas por partículas de polvo finas y temperaturas de gas altas).	(Nederman MikroPul, 2016).

Sobre las medidas de control generales comenta el grupo de Banco Mundial lo siguiente [15]:

- La altura de las chimeneas de todas las fuentes fijas de emisiones, ya sean o no "significativas", deberá diseñarse de conformidad con las normas internacional recomendada para la industria a fin de evitar concentraciones excesivas a nivel del suelo debidas a corrientes, turbulencias o inclemencias atmosféricas y de garantizar una difusión adecuada que reduzca al mínimo los impactos.
- Financiación del carbono, estrategia de reducción de emisiones de carbono supone el respaldo a los mecanismos para un desarrollo limpio por parte de la Administración, o bien la aplicación de las medidas de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Protección y fomento de sumideros y depósitos para gases de efecto invernadero
- Reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en el manejo de residuos, así como en la producción, el transporte y la distribución de energía.
- Recircular los aires para calentamiento de otros procesos

## Conclusiones

La dispersión de contaminantes atmosféricos por fuentes fijas, como ya se comprobó a lo largo de esta investigación, es multifactorial, dependiendo tanto de: parámetros que son constantes a lo largo del tiempo como el diámetro y altura física de la chimenea desde donde se descarga el contaminante; variables no constantes pero controlables por el ser humano como el gasto de la emisión, la velocidad de salida y la temperatura de salida del contaminante a la atmósfera; así como de factores no constantes e incontrolables por el ser humano, como son la temperatura del ambiente, la insolación solar entrante, la velocidad y la dirección del viento en esa región. De ahí que la estimación de la dispersión de contaminantes atmosféricos sea una tarea compleja, especialmente si no se cuenta con algún dato específico.

Dentro de las variables anteriores, se encontró que aquellas que más afectan el perfil de dispersión de un contaminante son tanto el gasto de emisión de éste como la estabilidad de Pasquill, la cual depende directamente de la velocidad del viento y la insolación solar. Es por lo anterior, que debido a la constante variación que tienen estas dos condiciones meteorológicas, la distribución del contaminante estudiado fue diferente para los años 2019 y 2020. De igual forma,



las localidades afectadas por la contaminación en cada año también difirieron considerablemente debido a la variación de la dirección del viento.

Aunque los resultados presentados en este documento son una aproximación del comportamiento de la descarga de CO<sub>2</sub> que una chimenea en Puerto Interior, Silao, Guanajuato podría llegar a tener; estos datos fueron de gran ayuda para identificar el alcance y el impacto ambiental que se podría tener en un radio de hasta 35 km de distancia. Se encontró que el alcance de las máximas concentraciones de CO<sub>2</sub> estimadas tanto para 2019 como para 2020, abarcaron un radio menor a 10 km desde la ubicación de la chimenea y en dirección del paso del viento que incluyen para los dos años las localidades de: El Refugio de los Sauces, Nápoles, Salitrillo, Chichimequillas y Comanjilla en Silao; y Albarradones, Lomas de Comanjilla, La Loza de los Padres y Duarte en León. De igual manera, fueron afectadas la Universidad IPN de Guanajuato, el Aeropuerto Internacional de Guanajuato, el Hospital de Alta Especialidad del Bajío y el Parque acuático Splash. Sin embargo, este comportamiento del contaminante es variable a lo largo del año y entre diferentes años, por la variación de la dirección del viento y la concentración del contaminante.

Existen tecnologías para la reducción de emisión de contaminantes atmosféricos que podrían implementarse para hacer más eficientes los procesos dentro de la industria e impactar mínimamente al ambiente. Algunas tecnologías que se sugirieron para procesos industriales fueron el horno de ahorro de energía y el colector de polvo de aire inverso de manga plana FS. También se recomendaron algunas prácticas industriales como: la recirculación de corriente de gases contaminantes en el proceso para calentar alguna sustancia en otra parte del proceso, el fomento de sumideros y depósitos para gases de efecto invernadero, entre otras.

## Agradecimientos

Se agradece a la Coordinación de Veranos de Investigación de la Universidad de Guanajuato por el apoyo económico otorgado.

## Referencias

- [1] Echeverri Londoño, C. A. (2019). Contaminación atmosférica. Ediciones de la U. <https://elibro-net.e-revistas.ugto.mx/es/ereader/ugto/127067?page=80>
- [2] Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología.
- [3] Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>. (2017, June 14). Retrieved July 17, 2021, from Instituto para la Salud Geoambiental website: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2>
- [4] Damaso, J., & Vega, L. N. (julio de 2020). Análisis de dispersión de contaminantes utilizando el modelo gaussiano en chimeneas. Obtenido de [https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3183/Juan\\_Trabajo\\_Bachiller\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3183/Juan_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [5] Universidad Pablo de Olavide. TEMA 2. "MODELOS de CONCENTRACIÓN de CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS." [www.upo.es/depa/webdex/quimfis/CA\\_old/php/apuntesCA0607\\_Tema2.pdf](http://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/CA_old/php/apuntesCA0607_Tema2.pdf). Accessed 17 July 2021.
- [6] Manzur, M. E., Benzal, G., & González, S. N. (2013, May). Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. In VII Congreso de Medio Ambiente.
- [7] Meteored. (2021). Histórico del clima en Guanajuato. <https://www.meteored.mx/guanajuato/historico>
- [8] Stackhouse, P. (2021). NASA POWER I Data Access Viewer. Retrieved July 18, 2021, from Nasa.gov website: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [9] Weather Data Services I Visual Crossing. (2021). Retrieved July 18, 2021, from Visualcrossing.com website: <https://www.visualcrossing.com/weather/weather-data-services#/login>
- [10] Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. (2013). Guanajuato I Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial – Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) de Guanajuato. Retrieved July 18, 2021, from Guanajuato.gob.mx website: [https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/informacion-sobre-tramites/98/Registro-de-Emisiones-y-Transferencia-de-Contaminantes-\(RETC\)-de-Guanajuato](https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/informacion-sobre-tramites/98/Registro-de-Emisiones-y-Transferencia-de-Contaminantes-(RETC)-de-Guanajuato)

[11] NMX-AA-107-1988 NORMA MEXICANA, CALIDAD DEL AIRE-ESTIMACION DE LA ALTURA EFECTIVA DE CHIMENEA Y DE LA DISPERSION DE CONTAMINANTES-METODO DE PRUEBA AIR QUALITY-EFFECTIVE STACK HEIGHT AND POLLUTANTS DISPERSION ESTIMATES- TEST METHOD PREFACIO. Retrieved from <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa107.pdf>

[12] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI. (2021). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. DENU. Retrieved July 18, 2021, from Inegi.org.mx website: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denu/default.aspx>

[13] Norican Group. (2020). *El horno de ahorro de energía StrikoMelter Plus+*. Striko Westofen A Norican Technology. <https://www.strikowestofen.com/es-es/strikomelter-plus-energy-saving-furnace>

[14] Nederman MikroPul. (2016). *Colector de polvo de aire inverso de manga plana*. Nederman Holding AB. <https://www.nedermanmikropul.com/es-mx/products/baghouse-dust-collectors/flat-bag-reverse-air-dust-collector>

[15] MUNDIAL, G. D. B. (2007). Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad.