

Guía didáctica y ejercicios de contaminación atmosférica


Carlos Alberto Wilches Bonilla



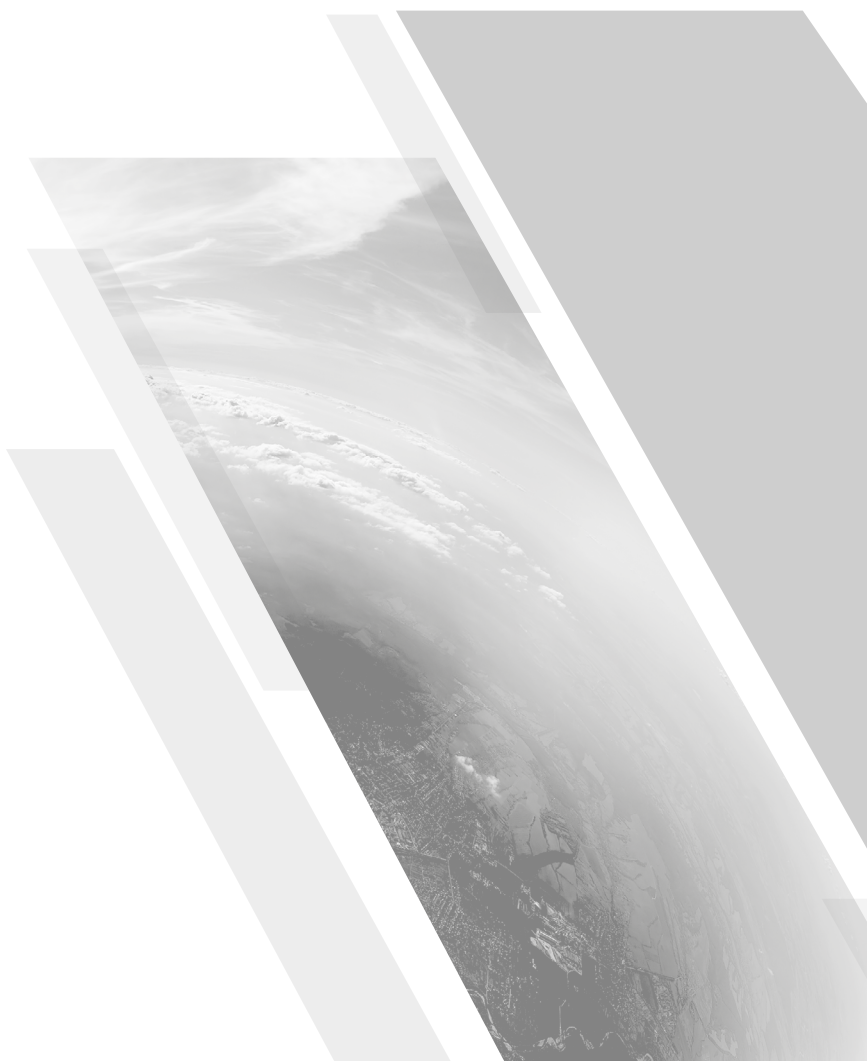
Carlos Alberto Wilches Bonilla

Carlos Alberto Wilches Bonilla: Ingeniero sanitario y ambiental.
Especialista en Sistemas Integrados de Gestión QHSE • Director
de Facultad y Coordinador de Programa de Ingeniería Sanitaria y
Ambiental.





Guía didáctica y ejercicios de contaminación atmosférica



628.53
W667

Wilches Bonilla, Carlos Alberto, autor
Guía didáctica y ejercicios de contaminación atmosférica / autor Carlos Alberto
Wilches Bonilla – 1 edición – Medellín: UPB, 2025 -- 53 páginas.
ISBN 978-628-500-171-0 (versión digital)

1. Atmósfera - Contaminación -- 2. Calidad del aire -- Medición
3. Aire - Factores de emisión -- 4. Guía de estudios -- 5. Ingeniería Sanitaria y
Ambiental

CO-MdUPB / spa / RDA
SCDD 21 / Cutter-Sanborn

© Carlos Alberto Wilches Bonilla
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
Vigilada Mineducación

Guía didáctica y ejercicios de contaminación atmosférica

ISBN: 978-628-500-171-0 (versión digital)

Primera edición, 2025

Escuela de Ingenierías y Arquitectura
Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Seccional Montería

Arzobispo de Medellín y Gran Canciller UPB: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Padre Diego Marulanda Díaz

Rector Seccional Montería: Pbro. Juan Camilo Restrepo Tamayo

Vicerrector Académico Sede Medellín: Juan Francisco Vásquez Carvajal

Vicerrector Académico Seccional Montería: Roger Góez Gutiérrez

Decana de la Escuela de Ingenierías y Arquitectura: Tulia Inés Gómez Márquez

Coordinadora Editorial UPB: Lisa María Colorado Rodríguez

Producción: Ana Milena Gómez Correa

Diseño y diagramación: María Isabel Arango Franco

Imagen portada: Shutterstock 2091066160

Corrección de Estilo: Juan Guillermo Bedoya

Dirección Editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2025

Correo electrónico: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Medellín - Colombia

Radicado: 2367-08-08-25

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Contenido

Introducción	7
Capítulo 1. Cálculos básicos	8
1.1 Problemas resueltos	8
1.2 Problemas propuestos	11
Capítulo 2. Balances de masa y factores de emisión	13
2.1 Problemas resueltos	19
2.2 Problemas propuestos	22
Capítulo 3. Elaboración de rosas de vientos	23
3.1 Generalidades de las rosas de viento	23
3.2 Utilidad de las rosas de viento	25
3.3 Ejercicio de aplicación de rosa de vientos	26
Capítulo 4. Modelos de dispersión por fuentes fijas	32
4.1 Generalidades de los modelos de dispersión atmosférica	32
4.2 Tipos de modelos de dispersión	32
4.3 Finalidad de la modelación de dispersión de contaminantes	34
4.4 Información necesaria para la modelación de contaminantes	34
4.5 Estabilidad atmosférica y tasa de cambio	36
4.6 Categorías de estabilidad atmosférica	36
4.7 Altura de mezcla de contaminantes	37
4.8 Ejemplo de aplicación Screen View	38
Capítulo 5. Estimación de emisiones fuentes móviles	43
5.1 Generalidades sobre fuentes móviles	43
5.2 Clasificación de fuentes móviles según tipo de combustible	43

5.3 Clasificación de fuentes móviles según categoría vehicular	44
5.4 Nivel de detalle de las emisiones	45
5.5 Métodos de estimación de emisiones vehiculares	46
Capítulo 6. Modelos de dispersión fuentes móviles	49
6.1 Generalidades modelo gaussiano lineal de dispersión	49
6.2 Determinación del σ_z o coeficiente de dispersión	50
6.3 Ejercicio de aplicación determinación del σ_z o coeficiente de dispersión	50
Bibliografía	52



Introducción

El programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería elaboró un compendio de guías de trabajo y material docente para facilitar el proceso enseñanza-aprendizaje. El resultado es esta guía que se convierte en un instrumento al servicio del estudiante de la asignatura de Contaminación atmosférica, con ejercicios de aplicación y tutoriales de los diferentes programas computacionales que se emplean en el curso para generar destrezas, aumentar el interés en la materia, y mejorar la comprensión y análisis de los fenómenos atmosféricos en la concentración de los contaminantes. Para la Facultad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental es un orgullo presentar ante la comunidad académica este material, por ser un producto del ejercicio docente durante varios años de la cátedra de Contaminación atmosférica; un material valioso que contribuye a la formación de mejores ingenieros sanitarios y ambientales comprometidos con la valoración y ordenamiento del recurso aire.

Capítulo 1

Cálculos básicos

Este capítulo tiene como objetivo que el estudiante de Ingeniería Sanitaria y Ambiental recuerde algunos conceptos básicos, tanto químicos como numéricos, necesarios para abordar la transformación de unidades y el contenido de la asignatura; un alcance que justifica el abordaje de ejercicios sobre cambio de unidades y concentración de contaminantes.

1.1 Problemas resueltos

1. La concentración media de NO_2 en una estación de calidad del aire, que se encuentra ubicada a 14°C y una presión del aire de 782 mm Hg, es de $980 \text{ ug}/\text{m}^3$. Expresa dicha concentración en ppm, moles/Litro, y en moléculas/ cm^3

Identificación de variables y datos para resolver el ejercicio:

$$[\text{NO}_2] = 980 \text{ Ug}/\text{m}^3 \quad T = 14^\circ\text{C} \quad P = 782 \text{ mmHg} \quad R = 0,082 \frac{\text{Litros atm}}{\text{mol Kelvin}}$$

$$\text{Número de Avogadro} = 6,023 \times 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$[N] = 14 \text{ gr}; [O_2] = 16 \text{ gr} \times 2 = 32 \text{ gr} \quad [\text{NO}_2] = 46 \text{ gr}$$

En el caso de los contaminantes atmosféricos gaseosos, cuando la concentración se expresa en partes por millón (ppm), se trata de una relación volumen/volumen, que puede expresarse de diferentes maneras según convenga.

$$[N] = 14 \text{ gr}; [O_2] = 16 \text{ gr} \times 2 = 32 \text{ gr} \quad [\text{NO}_2] = 46 \text{ gr}$$

La conversión que se solicita implica por lo tanto transformar la masa de NO_2 en volúmenes de NO_2 , para lo cual se puede recurrir a la ecuación de los gases ideales:

$$P \times V = n \times R \times T$$

O lo que también se puede representar como:

$$P \times V = \frac{m}{Mr} \times R \times T$$

De acuerdo con los datos proporcionados en el enunciado, la concentración de NO_2 es de 980 ug/m^3 , es decir, en un metro cúbico de aire hay una masa de 980 ug de NO_2 , masa que equivale a un volumen de:

$$\frac{782 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} \times V = \frac{980 \times 10^{-6} \text{ gr}}{46 \text{ gr}} \times 0,082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times (14 + 273)$$

$$V_{\text{NO}_2} = 4,87 \times 10^{-4} \text{ L} = 0,487 \text{ ml}$$

Por lo tanto, hay $0,487 \text{ ml}$ de NO_2 en cada m^3 de aire, es decir, la concentración de NO_2 es $0,487 \text{ ml/m}^3 = 0,487 \text{ ppm}$

$$[\text{NO}_2] = 0,487 \text{ ppm}$$

La concentración molar se obtiene convirtiendo la masa de dióxido de nitrógeno en moles, magnitudes relacionadas mediante la masa molecular relativa:

$$\frac{980 \times 10^{-6} \text{ gr}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ mol}}{46 \text{ gr}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{46 \text{ gr}} = 2,13 \times 10^{-8} \text{ mol/l}$$

$$[\text{NO}_2] = 2,13 \times 10^{-8} \text{ mol/l}$$

Finalmente, a partir de la concentración molar, y teniendo en cuenta el número de Avogadro, se relaciona moles con número de moléculas.

$$\frac{2,13 \times 10^{-8} \text{ mol/l}}{l} \times \frac{6,023 \times 10^{23} \text{ moléculas}}{1 \text{ mol}}$$

$$\times \frac{1 \text{ l}}{10^3 \text{ cm}^3} = 1,28 \times 10^{13} \text{ moléculas/cm}^3$$

$$[\text{NO}_2] = 1,28 \times 10^{13} \text{ moléculas/cm}^3$$

2. Usted como profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental es contratado para realizar los reportes de efectos en la salud pública de la concentración de contaminantes medidos por una estación de calidad del aire perteneciente al Sistema de Información de Calidad del Aire (Sisaire), según las siguientes concentraciones de SO_2 :
- 2816 ug/m^3 .
 - 790 ug/m^3 . (Presión 1 atm, temperatura 27 °C).
 - $5,0 \times 10^{13} \text{ moléculas}/\text{cm}^3$ (Presión 1 atm, temperatura 27 °C).

Tabla 1. Efectos de la concentración de SO_2

SO_2 ppm (V/V)	Efecto
0,2	Menor concentración que causa respuesta
0,3	Reconocimiento de sabores
0,5	Reconocimiento de olores
1,0	Irritación en los ojos
1,6	Constricción branquial reversible
2,0	Tos inmediata
10,0	Irritación de garganta inmediata

Fuente: tomado de Catalá Icardo (s.f).

Identificación de variables y datos para resolver el ejercicio:

- 2816 ug/m^3 .

$$R = 0,082 \frac{\text{Litros atm}}{\text{mol Kelvin}}$$

$$\text{Número de Avogadro} = 6,023 \times 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$[S] = 32,1 \text{ gr}; [O_2] = 16 \text{ gr} \times 2 = 32 \text{ gr} \quad [SO_2] = 64,1 \text{ gr}$$

$$P \times V = \frac{m}{Mr} \times R \times T$$

$$1 \times V = \frac{2816 \times 10^{-4} \text{ gr}}{64,1 \text{ gr}} \times 0,082 \times 273$$

$$V = 9,83 \times 10^{-4} \text{ l} = 0,983 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} = 0,983 \text{ ppm}$$

Con base en lo anterior y la información de la Tabla 1, afectará al reconocimiento de sabores y olores y podría causar irritación ocular en personas sensibles.

- b. 790 ug/m^3 . (Presión 1 atm, temperatura 27°C).

$$P \times V = \frac{m}{Mr} \times R \times T$$

$$1 \times V = \frac{790 \times 10^{-6} \text{ gr}}{64,1 \text{ gr}} \times 0,082 \times (27 + 273)$$

$$VSO_2 = 3,303 \times 10^{-4} \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} = 0,303 \text{ ppm}$$

De acuerdo con el valor obtenido de concentración y la Tabla 1 se establece que afectará al reconocimiento de sabores.

- c. $5,0 \times 10^{13} \text{ moléculas/cm}^3$ (Presión 1 atm, temperatura 27°C).

$$\frac{5,0 \times 10^{13} \text{ moléculas}}{\text{cm}^3} \times \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ mol}}{6,023 \times 10^{23} \text{ moléculas}} = 8,30 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$$

A 25°C y 755 mmHg , $8,30 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$ moles ocupan un volumen de:

$$P \times V = \frac{m}{Mr} \times R \times T$$

$$\frac{755}{760} \times V = 8,30 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3 \times 0,082 \times (25 + 273)$$

$$VSO_2 = 2,04 \times 10^{-3} \text{ l} = 2,04 \text{ ml}$$

La concentración de SO_2 de $2,04 \text{ ml/m}^3 = 2,04 \text{ ppm}$ lo que afectará el reconocimiento de sabores y olores, causando irritación ocular, constricción bronquial reversible y tos inmediata.

1.2 Problemas propuestos

- Convertir una concentración de $2,04 \times 10^{14} \frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^3}$ de CO a ppm y s moles litro, teniendo en cuenta una temperatura de 28°C y la presión de 1,15 atm.

2. Expresar las siguientes concentraciones de contaminantes gaseosos en las unidades que se piden:
- a. 400 ppm de CO, a 293 K y 101,3 Kpa a mg/m^3 CO.
 - b. 480 ug/m^3 SO_2 a ppm medidos a 15°C y 720 mmHg.
 - c. 230 ppm de CO, medidos en condiciones normales a mg/m^3 CO.
 - d. 350 ppm de SO_2 medidos en condiciones normales a mol/Litro SO_2
 - e. 300 mg/m^3 C_6H_6 a ppm.
 - f. 180 ppm de NO_2 medidos en condiciones normales a moléculas NO_2/cm^3 .
 - g. 250 mg/m^3 NO_2 medidos a 293 K y 101, 3 Kpa a NO_2

Capítulo 2

Balances de masa y factores de emisión

Balances de masa

Las emisiones de contaminantes al aire varían de una fuente a otra, por lo cual es necesario evaluar inicialmente la información disponible para la evaluación de emisiones atmosféricas. Esta información debe incluir las variables de diseño, operación y mantenimiento de los procesos y de los sistemas de control de emisiones. El balance de masas hace referencia a la cuantificación de emisiones por balance de materia y energía. En ocasiones, por las características del proceso industrial, es el único método para la cuantificación de emisiones que se puede emplear, por ejemplo, en las actividades industriales que manufacturan o emplean en sus procesos compuestos orgánicos volátiles, especialmente cuando las emisiones se producen de manera fugitiva, este procedimiento de evaluación se convierte en la primera alternativa para cuantificar la emisión de contaminantes. (Minambiente, 2010)

Con la aplicación del método de balance de masas se representan las entradas y salidas de un sistema con el fin de estimar de manera indirecta la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, es decir, las emisiones que se producen y pueden cuantificarse durante periodos de tiempo prolongados. El balance de masas es muy utilizado en situaciones donde se presentan reacciones químicas, y pertinente en casos de pérdida de determinada cantidad de material por liberación a la atmósfera. (Minambiente, 2010)

Para la determinación de emisiones contaminantes por medio de balance de masas, adicional a lo definido en el presente protocolo, se debe tener en

cuenta lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), mientras que el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia adopta el Manual de Inventario de Fuentes Puntuales del Protocolo Nacional para el Inventario de Emisiones.

A continuación, se presenta la Tabla 2 con la información necesaria para evaluar emisiones por el método de balance de masas.

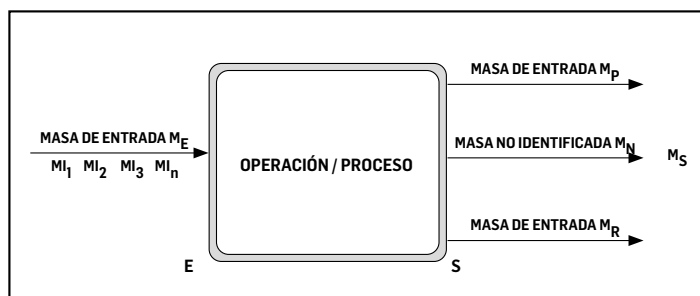
Tabla 2. Aspectos técnicos e información para los balances de masa

Aspecto técnico	Información
Información general de la fuente fija	Es necesario describir de manera general las actividades productivas que se realizan y obtener la información necesaria para identificar y clasificar la fuente fija de acuerdo con lo establecido en la Resolución 909 de 2008 o la que la adicione, modifique o sustituya.
Descripción de las instalaciones	Se requiere una descripción detallada del proceso productivo, incluyendo una explicación clara de las actividades realizadas (lo cual se puede realizar a través de un plano de distribución de planta), de los parámetros de emisión y de las chimeneas (si aplica).
Información del proceso o procesos que generan emisiones	La información sobre los procesos que generan emisiones debe incluir un diagrama de flujo de cada uno de los procesos analizados, así como su descripción. Se deben incluir los equipos de control de emisiones al aire que se utilizan y, adicionalmente, las variables del proceso como materias primas e insumos utilizados, la máxima tasa de operación de los equipos; las tasas máximas, normal y promedio de operación de los equipos, la caracterización y tasa de alimentación del combustible que utiliza y las horas de operación diarias, semanales y mensuales. Cuando el proceso se realice por lotes o cochadas (tipo batch), es necesario suministrar información sobre la duración y el número de lotes por día, por semana o por mes.
Descripción de la fuente o fuentes de emisión	Se debe realizar una descripción detallada de la fuente de emisión, comenzando por las generalidades del sector, según referencias bibliográficas nacionales o internacionales, incluyendo una explicación sobre la tecnología, las características de operación y el mantenimiento de acuerdo con lo establecido en la ficha o manuales técnicos de los equipos. Además, es necesario describir los procesos productivos y los mecanismos mediante los cuales se generan las emisiones.
Organización del procedimiento para la estimación de emisiones	Se requiere un diagrama de flujo que identifique las entradas y salidas del proceso. En sistemas de producción complejos, donde existan varios procesos independientes, se puede preparar un diagrama general con todos los procesos, cada uno representado por un bloque, y preparar diagramas de flujo para cada proceso individual en los que se detallen sus operaciones y procesos unitarios, y los equipos utilizados en cada uno de ellos.

Fuente: adaptado de Minambiente (2010).

Se deben indicar los puntos de entrada y salida del sistema donde se realice el balance, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Esquema de entradas y salidas de un sistema para la evaluación por balance de masas



Fuente: tomado de Minambiente (2010, p.27).

Donde:

$$M_E = M_{I1} + M_{I2} + M_{I3} + M_{IN} \quad M_S = M_P + M_R + M_N$$

$$M_E = M_S$$

M = Masa

E = Entrada

S = Salida

I = Insumo

MP = Producto

MR = Residuo / Emisiones / Vertimiento

MN = No identificado

MS = Salida total del proceso

Factores de emisión

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una unidad de actividad asociada a dicha emisión. Por ejemplo, en la cantidad de material procesado o la cantidad de combustible usado, la emisión se obtiene multiplicando el factor de emisión dado por la cantidad de material o combustible procesado. (EPA, 1996)

$$E = A \times F$$

Donde:

- E = Estimado de emisión para la fuente (a nivel de proceso)
- A = Nivel de actividad (por ejemplo, material producido)
- F = Factor de emisiones controladas (por ejemplo, kg de contaminantes emitidos/t de material procesado)

Si el factor de emisión fue desarrollado sin considerar la operación de un equipo de control, entonces se incorpora el término de efectividad del sistema de control (1-ER/100); por lo tanto, la ecuación queda así. (Minambiente, 2022)

$$E = A \times F \times (1 - ER/100)$$

Donde:

- E = Estimado de emisión para la fuente (a nivel de proceso)
- A = Nivel de actividad (por ejemplo, material producido)
- F = Factor de emisiones no controladas (por ejemplo, lb de contaminantes emitidas/t de material procesado)
- ER = Eficiencia general en la reducción de emisiones totales, expresada en porcentaje, que es igual a la eficiencia del equipo de captura, multiplicada por la eficiencia del equipo de control.

Si no hay un equipo de control, entonces, ER = 0. La EPA realizó una recopilación de factores de emisión para contaminantes criterio denominada AP-42.

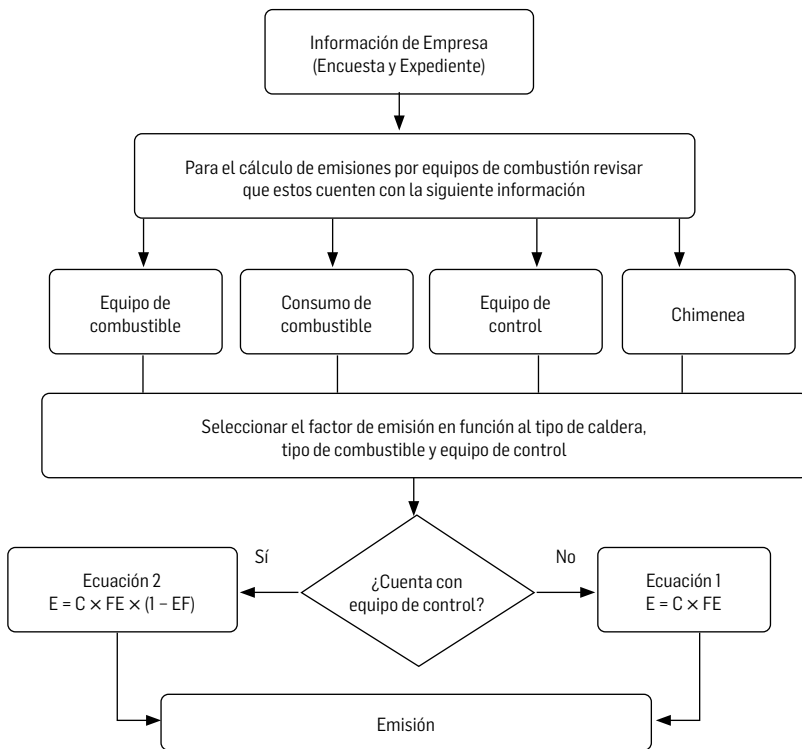
En Colombia también se han realizado estudios que suministran algunos factores de emisión. Los factores de emisión de la EPA están clasificados en A, B, C, D y E. “A” se considera el más confiable para un tipo dado de fuente, probablemente con base en sus mediciones en la fuente; y “E” es considerado el de más baja precisión y está dado por la falta de análisis a un número significativo de fuentes con esas características.

Cálculo de emisiones por combustión

La información para estimar las emisiones por combustión de una industria en particular consiste en determinar la capacidad del equipo de combustión, el consumo y tipo de combustible utilizado, el sistema de control de emisiones y horarios de operación. Para los equipos de control se analiza lo siguiente: si el equipo se encuentra relacionado al punto de generación del contaminante, el tipo de equipo, contaminante que controla y eficiencia del equipo.

El siguiente algoritmo resume la metodología a seguir:

Figura 2. Algoritmo para el cálculo de emisiones por combustión



Donde:

E = Emisión

FE = Factor de Emisión

C = Cantidad de Combustible

EF = Eficiencia mecanismo de control

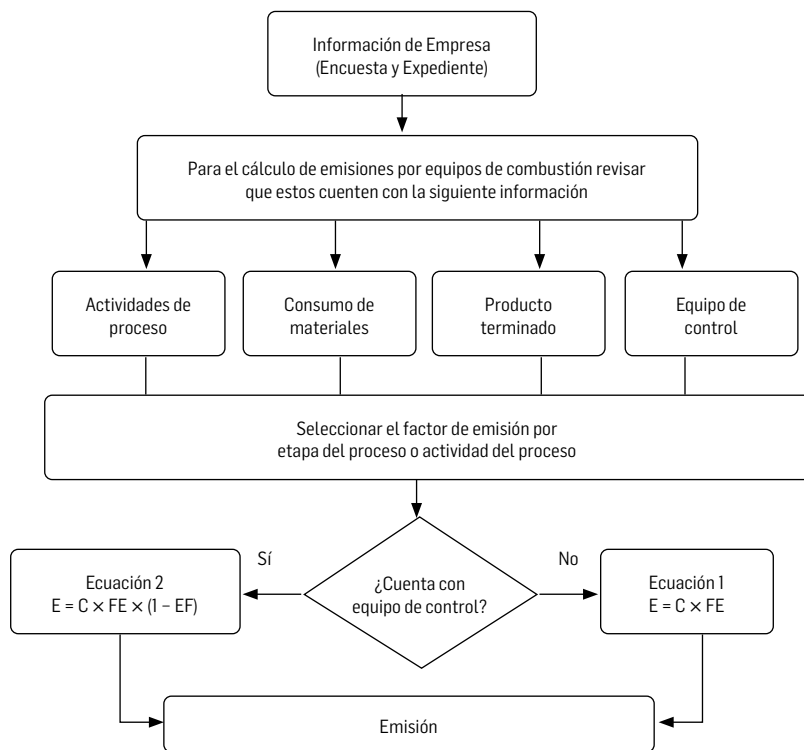
Fuente: Adoptado de Minambiente, 2017.

Cálculo de emisiones por proceso

Se debe analizar cada equipo u operación para cada etapa del proceso e identificar los factores de emisión adecuados por medio de una revisión de la información proporcionada por la empresa y el tipo de actividad de la misma; también, si cuenta con equipos de control y, en este caso, tener información de su grado de eficiencia.

La Figura 3 ilustra la metodología a seguir. Para un mejor entendimiento de los cálculos que se deben realizar, más adelante se presentan algunos ejemplos representativos de diferentes procesos.

Figura 3. Algoritmo de cálculo de emisiones por proceso



Donde:

E = Emisión

FE = Factor de Emisión

C = Cantidad de Combustible

EF = Eficiencia mecanismo de control

Fuente: Adoptado de Minambiente, 2017.

2.1 Problemas resueltos

Una central eléctrica quema 3800 ton/día de carbón para la producción de energía eléctrica. Si el carbón empleado contiene 1,2% de azufre, calcular:

- La cantidad de SO_2 (en toneladas) emitida a la atmósfera en un año.
- La cantidad de SO_2 (en toneladas) emitida a la atmósfera en un año, si la central dispone de un sistema de depuración que permite reducir en un 78% las emisiones de SO_2 .
- Las emisiones de SO_2 una vez depurado, expresada en ppm y en mg/m^3 , si el volumen de gases emitidos es de $3,7 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{día}$.

Datos:

La información disponible para resolver el problema es la siguiente:

$$\text{Consumo}_{\text{Carbón}} = 3800 \text{ Ton/día} \quad \% \text{SO}_2 = 1,2 \% \quad t = 1 \text{ año}$$

$$\text{Eficiencia}_{\text{depuración}} = 78 \% \quad R = 0,082 \frac{\text{L atm}}{\text{mol K}}$$

$$S = 32,1 \text{ gr} \quad O = 16 \text{ gr} \quad \text{SO}_2 = 64,1 \text{ gr}$$

- A partir del consumo de carbón en la central y la composición del mismo se determina la cantidad de azufre que anualmente se genera:

$$3800 \text{ Ton/día} \times 365 \text{ días} \times \frac{1,2 \text{ Ton S}}{100 \text{ Ton}_{\text{Carbón}}} = 1,664 \times 10^4 \text{ Ton S}$$

Esta masa de azufre equivale a los siguientes moles de azufre, calculados considerando la masa atómica relativa del mismo:

$$1,664 \times 10^4 \text{ Ton S} \times \frac{10^6 \text{ gr S}}{100 \text{ Ton}_S} \times \frac{1,0 \text{ mol S}}{32,1 \text{ gr}_S} = 5,1814 \times 10^8 \text{ mol}_S$$

Todo el azufre es emitido a la atmósfera en forma de dióxido de azufre, generándose por cada mol de azufre un mol de SO_2 .

$$n S = n \text{SO}_2 = 5,1814 \times 10^8 \text{ moles}$$

$$5,1814 \times 10^8 \text{ moles}_{\text{SO}_2} \times \frac{64,1 \text{ g}_{\text{SO}_2}}{1 \text{ mol}_{\text{SO}_2}} \times \frac{1 \text{ t}_{\text{SO}_2}}{10^6 \text{ g}_{\text{SO}_2}} = 3,32 \times 10^4 \text{ Ton}_{\text{SO}_2}/\text{año}$$

- b. A partir de la cantidad de SO_2 generada anualmente y determinada en el apartado anterior, se determina la cantidad que es retenida por el sistema de depuración. La eficiencia del sistema de depuración puede definirse como:

$$\text{Eficiencia}_{\text{Depuración}} = \frac{m_{\text{retenida}}}{m_{\text{generada}}} \times 100 \%$$

$$78 = \frac{m_{\text{retenida}}}{3,32 \times 10^4 \text{ Ton}_{\text{SO}_2}/\text{año}} \times 100 \%$$

$$m_{\text{retenida}} = 2,59 \times 10^4 \text{ Ton}_{\text{SO}_2}/\text{año}$$

En primer lugar, a partir de la masa de SO_2 emitida en el apartado b) y del volumen de gases emitidos diariamente, se determina la cantidad de SO_2 emitida por cada metro cúbico de gases generados:

$$\frac{7,3 \times 10^3 \text{ t}_{\text{SO}_2}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{3,7 \times 10^7 \text{ m}^3} \times \frac{10^9 \text{ mg}}{1 \text{ t}} = 540,5 \text{ mg}/\text{m}^3$$

Para determinar la concentración de SO_2 en ppm, se ha de transformar la masa de SO_2 a volumen ya que, como se ha indicado en el caso de gases, al hablar de ppm se trata de una relación volumen/volumen. Este cálculo se realizará con la ayuda de la ecuación de los gases ideales teniendo en cuenta que el volumen está referido a condiciones normales (1 atm; 0 °C), o de modo más sencillo, recordando que un mol de cualquier gas en condiciones normales ocupa 22,4 l.

$$540,5 \text{ mg}/\text{m}^3 \times \frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{SO}_2}}{64,1 \text{ g}_{\text{SO}_2}} \times \frac{22,4 \text{ l}}{1 \text{ mol}} \times \frac{10^3 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 188,9 \text{ ml}/\text{m}^3$$

$$[\text{SO}_2] = 540,5 \text{ mg}/\text{m}^3 = 188,9 \text{ ppm}$$

Una estufa averiada emite 23,42 l de gases cada minuto, con un contenido de monóxido de carbono de 2,24 mg/l. Considerando que la emisión de CO es constante e independiente de la concentración de oxígeno, determinar cuál será la concentración de CO en la habitación al cabo de 10 horas, expresada en mg/m³ y en ppm, sabiendo que la habitación tiene una altura de 2,4 m, por 3,2 m de ancho y 4,7 m de largo, y se encuentra a 29 °C y 752 mmHg.

Datos:

La información disponible para resolver el problema es la siguiente:

$$Q = 23,42 \text{ l}/\text{min} \quad [CO] = 2,24 \text{ mg}/\text{l} \quad t = 10 \text{ h}$$

$$\text{Dimensiones} = 2,4 \text{ m} \times 3,2 \text{ m} \times 4,7 \text{ m} \quad T = 29^\circ\text{C} \quad P = 752 \text{ mmHg}$$

Teniendo en cuenta el caudal de emisión de los gases, y la concentración de CO en los mismos, se puede calcular la masa de CO emitida en un periodo de 10 horas:

$$10 \text{ h} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{23,42 \text{ l}_{\text{gas}}}{1 \text{ min}} \times \frac{2,24 \text{ mg}_{\text{CO}}}{1 \text{ l}_{\text{gas}}} = 31476,5 \text{ mg CO}$$

Las dimensiones de la habitación, el volumen ocupado por el gas es:

$$V = 2,4 \times 3,2 \times 4,7 = 36,096 \text{ m}^3$$

Por tanto, la concentración de CO en la habitación será:

$$[CO] = \frac{31476,5 \text{ mg}}{36,096 \text{ m}^3} = 872,0 \text{ mg}/\text{m}^3$$

Para hacer la transformación de dicha concentración en ppm, teniendo en cuenta la temperatura y presión de la habitación se transforma la masa de CO en volumen:

$$P \times V = \frac{m}{Mr} \times R \times T$$

$$\frac{752}{760} \times V = \frac{872 \times 10^{-3}}{28} \times 0,082 \times (29 + 273)$$

$$V_{\text{CO}} = 0,7794 \text{ l} = 779,4 \text{ ml}$$

Volumen de CO que se encuentra en un m^3 de aire, lo que corresponde a una concentración de $779,4 \text{ ml}/\text{m}^3$.

$$[CO] = 779,4 \text{ ppm}$$

2.2 Problemas propuestos

1. Calcular las emisiones anuales de NOX de una caldera sin sistema de control en una planta termoeléctrica (consumo de calor >100 millones de BTU/h) que quema gas natural. El consumo anual de gas natural es de 40 millones de metros cúbicos. Tenga en cuenta que el factor de emisión es $8800 \text{ kg}/10^6 \text{ m}^3$.
2. En la ladrillera Arcillas & Arcillas el proceso de fabricación comienza con la extracción de la materia prima (arcilla), la cual es apilada a la intemperie dentro de la planta y mensualmente se apilan aproximadamente 3300 toneladas. Esta arcilla es llevada por medio de maquinaria pesada a la tolva dosificadora a fin de iniciar la etapa de molienda en seco. Una vez lograda la granulometría requerida se inicia con la etapa de conformado del ladrillo, para luego ser almacenados bajo techo, a fin de iniciar con el secado, en el cual se retira el exceso de humedad por medio de la temperatura ambiente. Por último, se realiza el proceso de cocción en un horno tipo Hoffman, cuyo principio de operación es el desplazamiento de fuego a lo largo de su trayectoria. Se usa como combustible carbón mineral pulverizado (2 t/día). La producción mensual en la ladrillera Arcillas & Arcillas es de 2800 toneladas, lo que equivale a una producción promedio de 330000 ladrillos. Calcular las emisiones de PST, NOX y SO₂ generadas en los diferentes procesos de la planta.
3. En la cristalería Crisorse produce vidrio para botellas, con una producción de 7000 t/mes. En la etapa de fundido se utiliza un horno de fusión con depurador Venturi, el cual tiene una eficiencia de remoción del 90%. El carbón se usa como combustible a razón de 10 t/día y la frecuencia de trabajo es de 24 h/día y 7 días a la semana.
4. La empresa Cal-mía se dedica a la producción de cal viva. Se utiliza como combustible 8 t/h de carbón y se tiene el resultado de un muestreo isocinético realizado que reporta como emisión de PST 30.04 kg/h. A la etapa de horneado se alimentan 0.8 t/h de CaCO₃.
5. Cempro S.A. productora de cemento, reporta que produce 260 t/día de Clinker. Uno de sus procesos se lleva a cabo en un horno seco que utiliza como equipo de control un filtro de mangas. Calcule la emisión de PM₁₀.



Capítulo 3

Elaboración de rosas de vientos

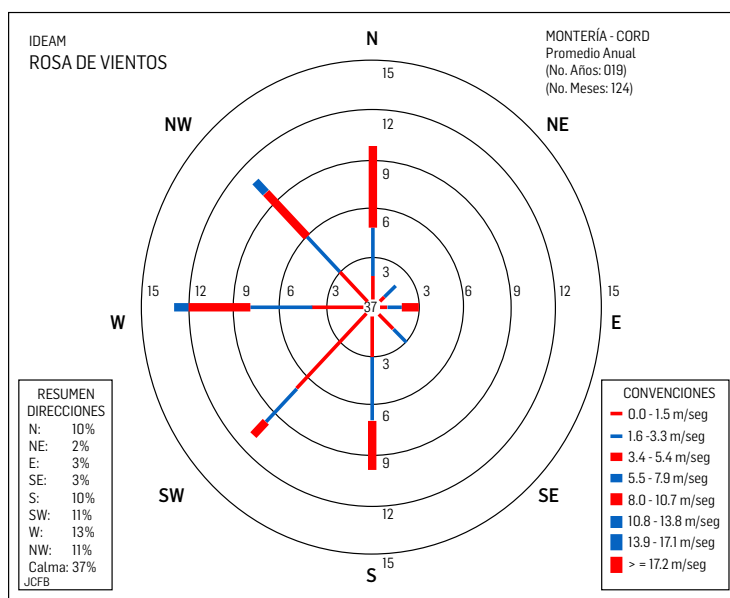
3.1 Generalidades de las rosas de viento

Por definición, el viento es el movimiento natural del aire. Se determina por dos factores: la dirección, que se mide al procesar la información de la red de estaciones que identifican el punto del horizonte desde donde sopla; y por su velocidad, de la cual depende su mayor o menor fuerza. Si bien el viento es una cantidad vectorial y se puede considerar una variable primaria por naturaleza, por lo general la velocidad (la magnitud del vector) y la dirección (orientación del vector) se tratan frecuentemente como variables independientes. (IDEAM, 2022)

La velocidad del viento determina el desplazamiento del aire en un tiempo determinado, mientras que, por lo general, la dirección se define como la orientación del vector del viento en la horizontal expresada en grados, contados a partir del norte geográfico, en el sentido de las manecillas del reloj.

Para propósitos meteorológicos, por ejemplo, un viento del oeste sopla con orientación de 270° a partir del norte; un viento del norte sopla desde una dirección de 360° . Las distintas direcciones del viento están referidas a la rosa de los vientos que señala los puntos cardinales, y pueden presentarse en 4, 8, 12 y 16 rumbos. (IDEAM, 2022)

Figura 4. Rosa de vientos para la ciudad de Montería



Fuente: Adoptado de IDEAM 2022.

En la Tabla 3, se presenta la Escala Beaufort para la fuerza del viento, con indicación de las velocidades equivalentes en metros por segundo.

Tabla 3. Escala de Beaufort para la fuerza del viento

Escala	Velocidad promedio (m/s)	Características
0	0,1	Calma; el humo sube verticalmente
1	0,90	Ventolina; la dirección se muestra por la dirección del humo. Las veletas no alcanzan a moverse.
2	2,4	Brisa muy débil; se siente el viento en la cara, las hojas de los árboles se mueven; las veletas giran lentamente.
3	4,4	Brisa débil; las hojas y las ramas pequeñas se mueven constantemente; el viento despliega las banderas.
4	6,7	Brisa moderada; se levantan el polvo y los papeles del suelo; se mueven las ramas pequeñas de los árboles.
5	9,4	Brisa fresca; los árboles pequeños se mueven, se forman olas en las aguas quietas.
5	12,3	Brisa fuerte; se mueven las ramas grandes de los árboles, los paraguas se mantienen con dificultad.

Escala	Velocidad promedio (m/s)	Características
7	15,5	Viento fuerte; los árboles grandes se mueven, se camina con dificultad contra el viento.
8	19,0	Viento duro; se rompen las ramas de los árboles, no se puede caminar en contra del viento.
9	22,6	Viento muy duro; el viento arranca tejados y chimeneas, se caen arbustos, ocurren daños fuertes en las plantaciones.
10	26,4	Temporal huracanado; raro en los continentes, arranca los árboles y las viviendas sufren daños muy importantes.
11	30,5	Borrasca.
12	32,7	Huracán.

Fuente: Adoptado de IDEAM 2019.

3.2 Utilidad de las rosas de viento

Cálculo de altura de chimeneas

La dirección predominante del viento en Colombia se debe determinar con base en la información suministrada por las rosas de vientos definidas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). En los casos que se utilicen rosas de vientos que no hayan sido definidas por el IDEAM, únicamente se aceptarán rosas de vientos que estén soportadas como mínimo con un año de información de la zona. Cuando el mayor de los porcentajes de frecuencia corresponda a una condición de calma, este valor no se considerará para determinar la dirección predominante del viento. En este caso, se utilizará la información de las frecuencias en las demás direcciones. Cuando los mayores porcentajes de frecuencia de dirección tengan el mismo valor, el cálculo de la altura de la chimenea se realizará con cada una de estas direcciones y se utilizará como dirección predominante la que dé como mayor valor de altura del ducto. (Territorial, 2010)

Así mismo, en aquellos casos en los que una estructura nueva, al calcular la altura de la chimenea mediante la aplicación de buenas prácticas de ingeniería, encuentre que es la única dentro de la región cercana, es decir que no tiene ningún tipo de obstáculo del terreno o estructura a 800 metros a la redonda, deberá utilizar la ecuación establecida para estructuras existentes.

Identificación de receptores para modelos de dispersión

Para el caso de la aplicación de modelos de dispersión, el término cercano se refiere a distancias de hasta ochocientos (800) metros, excepto cuando la altura de una condición del terreno a la distancia de 800 metros, medidos desde la fuente, sea igual o superior al 40 % de la altura de la chimenea. En este caso, la región cercana se extenderá hasta una distancia de diez (10) veces la altura máxima de dicha condición (HT) o 3200 metros (2 millas), la que sea menor. Para determinar el área en la cual se debe aplicar el modelo de dispersión de los contaminantes, se debe medir la altura característica del terreno a una distancia de 800 metros en dirección predominante del viento.

3.3 Ejercicio de aplicación de rosa de vientos

Para poder realizar la actividad de generación de rosa de vientos es necesario contar con los siguientes equipos y materiales:

- Equipo de cómputo con programa WRPLOT View (descargar el *software* en <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>)
- Hoja de Excel con el archivo meteorológico de trabajo.

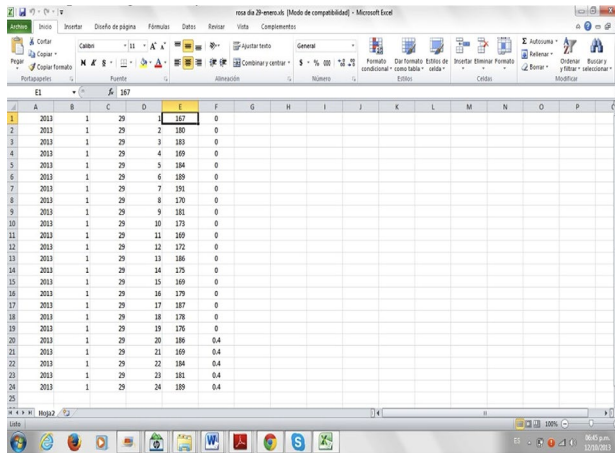
WRPLOT View es un programa computacional encargado de representar la dirección y velocidad del viento. El programa de rosa necesita como insumo de información los datos meteorológicos para proporcionar rosas de viento, visualizar parcelas, análisis de frecuencia y gráficos de color de rosa para varios formatos de datos. Una rosa de vientos representa la frecuencia de ocurrencia de los vientos en cada uno de los sectores de la dirección del viento, y las clases de velocidad del viento para una ubicación y un período de tiempo.

Ingreso de datos al programa WRPLOT View

La información a ingresar al programa WRPLOT View se debe organizar en un libro de Excel y debe estar distribuida de la siguiente manera: en la columna A, el año que se está analizando; en la columna B, el mes; en la columna C, el día del mes que se quiere representar en la rosa de vientos

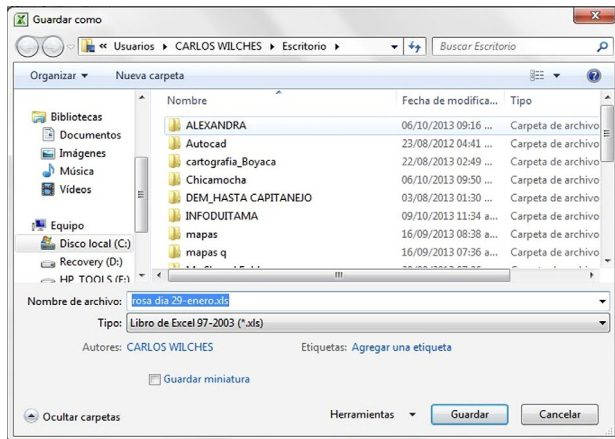
(este dato no va en día juliano); en la columna D debe ir la hora, expresada de manera militar (de 1 a 24); en la columna E, el rumbo o ángulo de dirección, y por último en la F, la velocidad del viento en metros por segundo (m/s) presentados en cada hora del día hasta llegar a la hora 24.

Figura 5. Datos en libro de Excel para ingresar información en WRPLOT



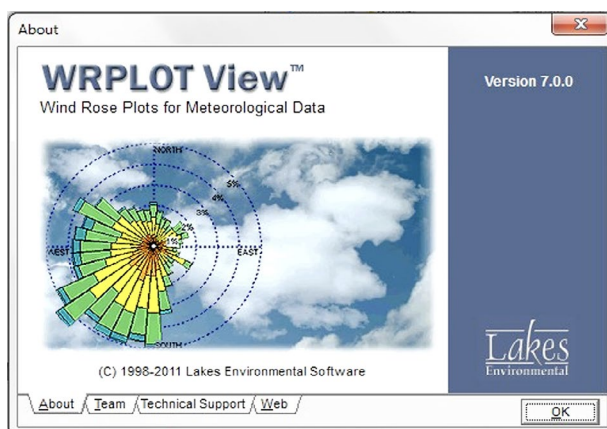
Una vez se tengan los datos en el libro de Excel se debe guardar el archivo como libro de Excel 97 a 2003 como se aprecia en la Figura 6.

Figura 6. Ventana emergente para guardar el archivo



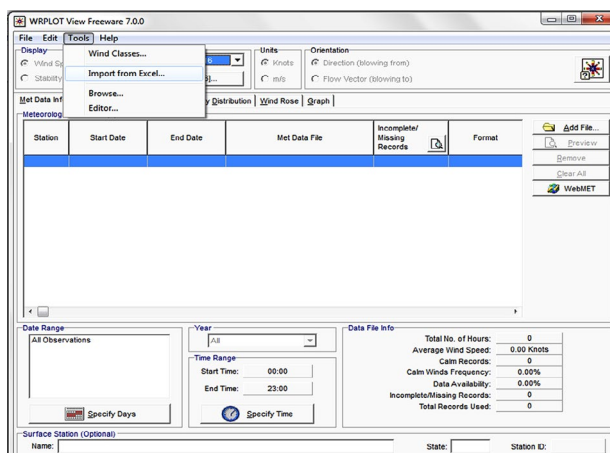
Luego, al abrir el programa WRPLOT View se debe hacer clic en el botón OK.

Figura 7. Pantalla de bienvenida al programa WRPLOT VIEW



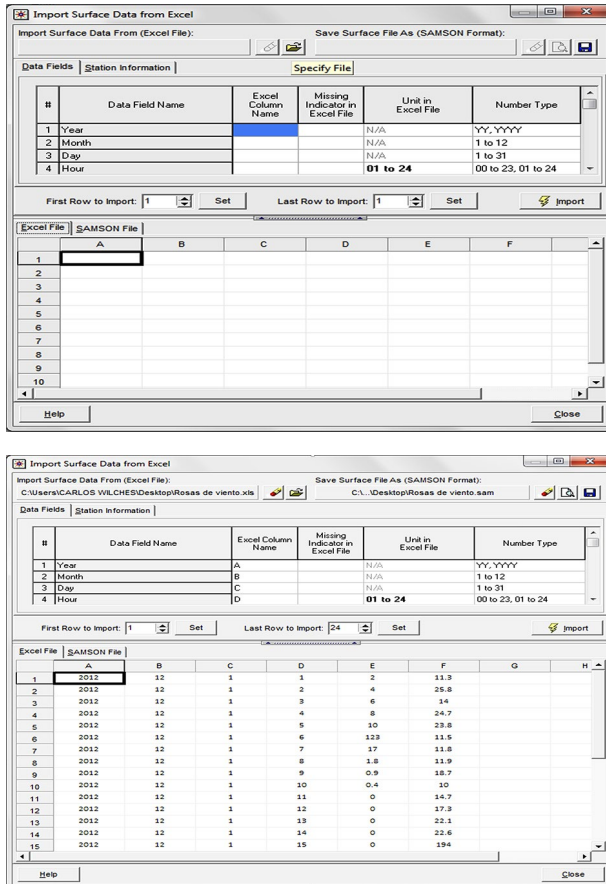
Una vez en la pantalla del programa WRPLOT View dar clic en la pestaña Tools y hacer clic en la opción Import from Excel para importar el archivo de Excel guardado antes en formato 97 a 2003, como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Pantalla de WRPLOT y pestaña de importar archivo



Dar clic en el ícono de la carpeta y escoger el archivo guardado en Excel formato 97 a 2003.

Figura 9. Pantalla de importar archivo y carga del mismo



Diligenciar el espacio solicitado en la parte superior y poner únicamente las letras del libro de Excel como aparecen en las columnas.

Year: A

Month: B

Day: C

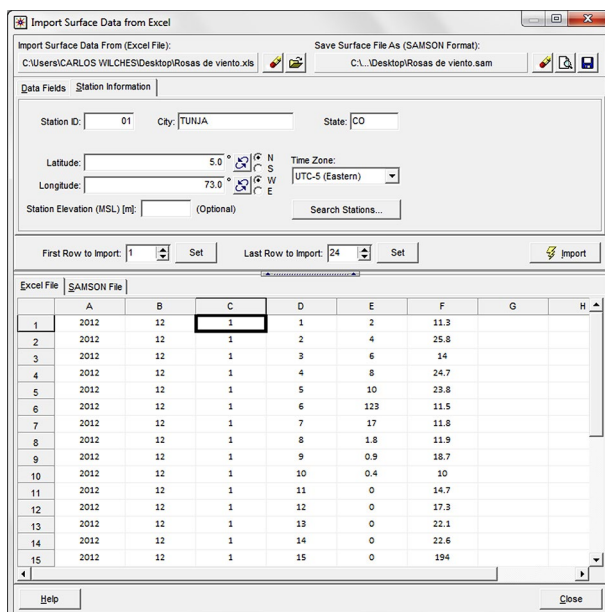
Hour: D (no olvidar, ésta debe registrarse en el formato 01 to 24)

Wind direction: F

Wind speed: E

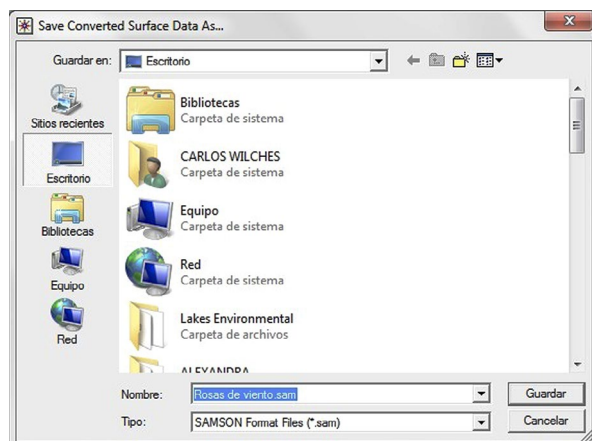
Dar clic en la pestaña Station Information e ingresar la información solicitada de la estación (ver Figura 10).

Figura 10. Pestaña de diligenciamiento de información de la estación



Dar clic en el ícono que tiene forma de *diskette*, seleccionar la carpeta destino donde desea guardar el archivo; importante, éste debe estar con la extensión *.sam y, por último, dar clic en guardar.

Figura 11. Ventana para guardar el archivo con la extensión *.sam

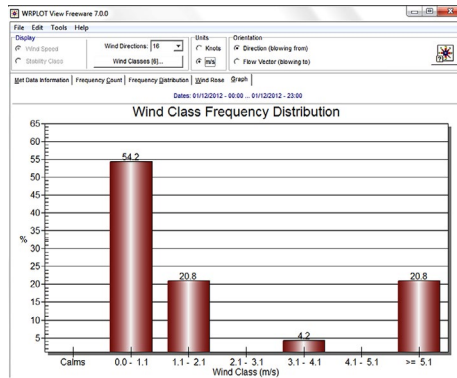


Por último, dar clic en el ícono que tiene forma de rayo y la opción Import; el programa automáticamente generará un archivo en Word pad, y por último cerrar este archivo y dar clic en la pestaña Close en la pantalla de diligenciamiento de información de la estación (ver Figura 10).

Luego, en el menú inicial de la pantalla, dar clic en el botón Add file y cargar el archivo generado con la extensión *.sam y por último dar clic en cada una de las pestañas de la parte superior.

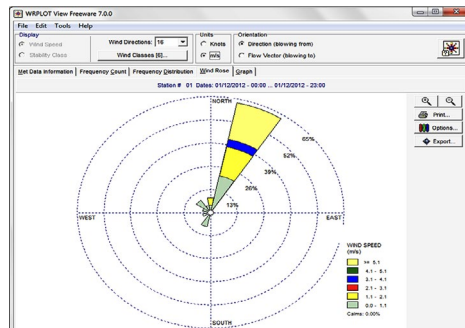
Por ejemplo, en la pestaña Graph se observará un histograma de las frecuencias de la velocidad del viento.

Figura 12. Diagrama de distribución de frecuencias de velocidad del viento



Por último, en la pestaña Graph se observa la rosa de vientos para el gráfico del día.

Figura 13. Rosa de vientos obtenida por WRPLOT View



Capítulo 4

Modelos de dispersión por fuentes fijas

4.1 Generalidades de los modelos de dispersión atmosférica

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos son modelos matemáticos que permiten hacer una estimación de la concentración de un contaminante en la atmósfera según un conjunto amplio de variables que interfieren en el proceso. Las principales variables que influyen en los modelos de dispersión atmosférica son (Eurofins, 2020):

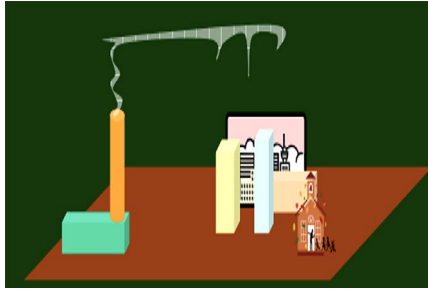
- Cantidad de contaminante emitida por unidad de tiempo, posición y altura de emisión.
- Velocidad y dirección de los vientos dominantes. Estabilidad atmosférica. Altura de Mezcla.
- Comportamiento químico del contaminante, posibles reacciones, vida media de la sustancia.

4.2 Tipos de modelos de dispersión

Modelos gaussianos de dispersión (vertidos puntuales)

Son los que se utilizan para estimar la concentración de contaminante producida por una fuente puntual, por ejemplo, la chimenea de una fábrica o el escape de un depósito. El objetivo de este tipo de modelo es determinar la concentración de un contaminante a cierta distancia de la fuente. (Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla, 2020)

Figura 14. Modelo gaussiano de dispersión

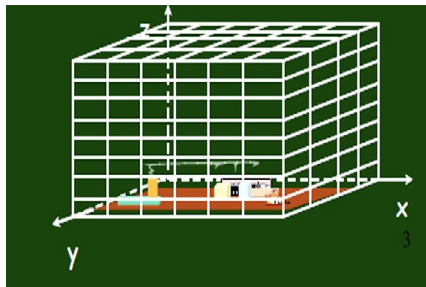


Fuente: Modelo Gaussiano de dispersión recuperado 10 de Junio de 2020 de
[<https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf>]

Modelos combinados (celda múltiple)

Son los que se utilizan en la práctica para estimar concentraciones de contaminante en regiones definidas (ciudades, por ejemplo). Este se caracteriza por dividir el volumen total de aire en pequeñas celdas en las que se almacena de manera numérica, las concentraciones de varios contaminantes. El modelo tiene en cuenta la estabilidad de los contaminantes, así como los flujos de materia que pasan de una celda a otra (parcelas de aire).

Figura 15. Modelos de dispersión combinados (celda múltiple)



Fuente: Modelo de dispersión de Celda Múltiple recuperado 10 de Junio de 2020 de
[<https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf>]

4.3 Finalidad de la modelación de dispersión de contaminantes

Los usos que se pueden lograr con la modelación son:

1. Determinación de áreas de influencia.
2. Predicción del impacto ambiental causado por obras futuras.
3. Directrices de regularidades y requerimientos legales.
4. Evaluación del grado de contaminación en áreas urbanas y rurales.
5. Diseño de redes de monitoreo.
6. Definición de máximos contribuyentes en un área determinada.
7. Análisis de riesgos (escapes accidentales de gases tóxicos).
8. Cálculo de altura de chimeneas.
9. Herramientas de decisión en elección de sistemas de control.
10. Diseño de programas de prevención.

4.4 Información necesaria para la modelación de contaminantes

Para la Ejecución de un modelo de Calidad del Aire se debe contar una caracterización de la geografía, el clima, la población y el desarrollo urbano del área de estudio. Se debe hacer una revisión del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) o su equivalente, estudiando detalladamente aspectos relacionados con la calidad del aire. (IDEAM, 2010)

En particular, se deberá incluir una descripción de los siguientes puntos

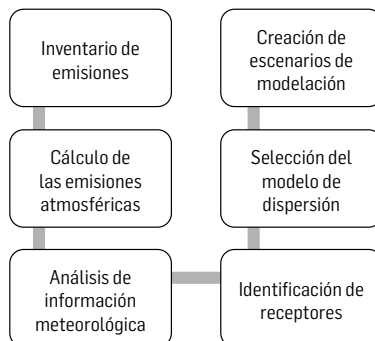
- **Inventario de emisiones:** Es un instrumento para la gestión de la calidad del aire que permite conocer las emisiones contaminantes y las fuentes emisoras en un área geográfica específica y un periodo de tiempo determinado (normalmente un año). Un estudio completo debe abarcar todas las fuentes presentes en la zona definida y debe suministrar la localización, magnitud, frecuencia, duración y contribución relativa de ellas.
- **Cálculo de emisiones atmosféricas:** La aplicación del método de balance de masas se representan las entradas y salidas de un sistema con el fin de estimar de manera indirecta la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, es decir, las emisiones que se producen

y pueden cuantificarse durante periodos de tiempo prolongados. El balance de masas es muy utilizado en situaciones donde se presentan reacciones químicas, siendo apropiados en situaciones donde se pierde determinada cantidad de material por liberación a la atmósfera.

- **Análisis de información meteorológica:** Las características meteorológicas de un área determinada influyen directamente en la calidad del aire. En este sentido, los parámetros necesarios para un modelo de dispersión de contaminantes son:
 - Temperatura media del aire
 - Precipitación
 - Humedad Relativa
 - Velocidad y dirección del viento
 - Radiación solar
 - Rosa de vientos
 - Estabilidad atmosférica
 - Altura de mezcla de contaminantes

Con estos datos mínimos se deben determinar predominancias en velocidad y dirección del viento con miras a establecer la dirección consecuente de los contaminantes y su grado de dispersión en la atmósfera. Por otra parte, es importante el análisis de la pluviometría de la zona con fines de determinar o acercarse a las implicaciones de la remoción húmeda en la zona (lavado atmosférico). La combinación de otros aspectos como perfiles atmosféricos, nubosidad y datos de superficie como temperatura, radiación solar y velocidad del viento deben llevar a la estimación de la estabilidad atmosférica.

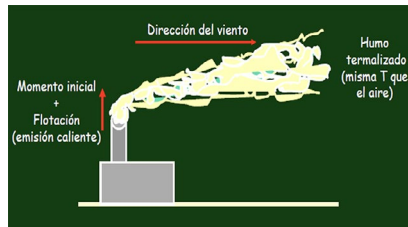
Figura 16. Variables de entrada y salida de un modelo de dispersión



4.5 Estabilidad atmosférica y tasa de cambio

La estabilidad o equilibrio atmosférico es la condición del aire en reposo, en el cual los movimientos convectivos no existen o están restringidos. En este sentido, se define la inestabilidad atmosférica como la condición de movimientos convectivos predominantes de una masa de aire. (IDEAM, 2007)

Figura 17. Tasa de cambio y dispersión de la pluma de una fuente de emisión



Fuente: Estabilidad atmosférica recuperado 10 de Junio de 2020 de
[\[https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf\]](https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf)

4.6 Categorías de estabilidad atmosférica

En horas diurnas, teniendo conocimiento de la velocidad del viento y la radiación global, se utiliza como referencia la Tabla 4 para definir la clase de estabilidad. (IDEAM, 2007)

Tabla 4. Categorías de estabilidad atmosférica diurna

Velocidad del viento 10 (m/s)	Radiación solar global (W/m ²)					
	> 700	700 - 540	540 - 400	400 - 270	270 - 140	< 140
< 2	A	A	B	B	C	D
2 - 3	A	B	B	B	C	D
3 - 4	B	B	B	C	C	D
4 - 5	B	B	C	C	D	D
5 - 6	C	C	C	C	D	D
> 6	C	C	D	D	D	D

Fuente: Adoptado de User's Guide For The Aermod Meteorological Preprocessor (AERMET). USEPA 2004.

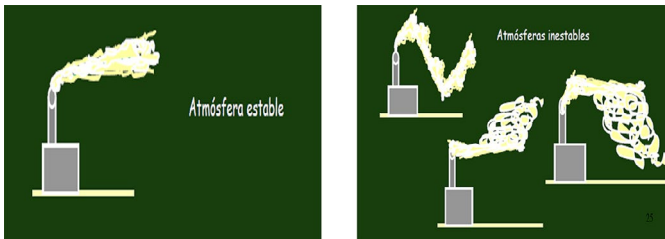
En horas nocturnas, teniendo conocimiento de la velocidad del viento y la radiación neta se utilizan los datos de la Tabla 5 para definir la categoría de estabilidad.

Tabla 5. Categorías de estabilidad atmosférica nocturna

Velocidad del viento 10 (m/s)	Radiación solar global (W/m ²)		
	> -20	-20 a -40	< -40
< 2	D	F	F
2 -3	D	E	F
3 -4	D	D	E
4 -5	D	D	D
5 - 6	D	D	D
> 6	D	D	D

Fuente Adoptado de User's Guide For The Aermod Meteorological Preprocessor (AERMET). USEPA 2004.

Figura 18. Comportamiento de la pluma en función de la estabilidad atmosférica



Fuente: Pluma y estabilidad atmosférica recuperado 10 de Junio de 2020 de [\[https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf\]](https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf)

4.7 Altura de mezcla de contaminantes

Es definida como la altura en la atmósfera hasta donde los contaminantes alcanzan a ser mezclados y dispersados (entre más alta, mayor volumen para la dilución de los contaminantes) y depende de la rugosidad superficial local, de la velocidad del viento, y la radiación solar, entre otros factores. La altura de mezcla se determina con la ecuación de Randerson, la cual es:

$$Z_m = 320 u$$

Donde U es la velocidad del viento a 10m de altura. La altura mecánica de la capa de mezcla es el mínimo valor diario de la altura de la capa de mezcla, y por este motivo, si el valor de Z_m es menor que la altura del penacho, se igualará el valor de Z_m a la altura de la pluma.

4.8 Ejemplo de aplicación Screen View

La presente guía tiene de manera detallada un instructivo para la estimación de contaminantes de algunas fuentes emisoras en específico, a través del modelo Screen View 3, Este *software* está disponible en el siguiente enlace: <https://www.weblakes.com/products/screen/index.html>

Para el ejemplo, una ladrillera emite 10,8 gr/s de contaminantes de material particulado. Inquietos con esta tasa, la fábrica lo contrata a usted para hacer las modificaciones en el permiso de emisiones ante la autoridad ambiental. Los datos son los siguientes:

- Velocidad del viento: 2,5 m/s.
- Temperatura de salida del contaminante: 350 °C.
- Temperatura ambiental: 25 °C.
- Altura de la chimenea: 13 m
- Diámetro de la chimenea: 40 cm

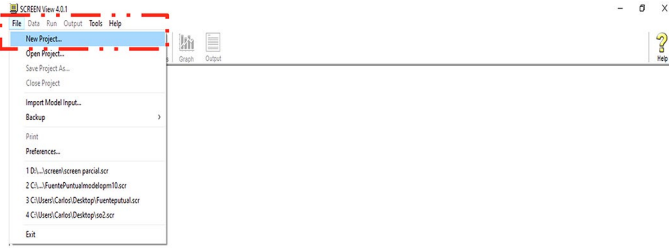
Realice los escenarios de modelación para condiciones estándar y las diferentes estabilidades atmosféricas y determine las medidas de ingeniería adecuadas, teniendo en cuenta las distancias de los receptores descritos en la Tabla 6.

Tabla 6. Distancias de receptores respecto a la fuente

Receptor	Distancia (m)
Centro de salud	40
Escuela rural	100
Parroquia veredal	250
Salón comunal	600

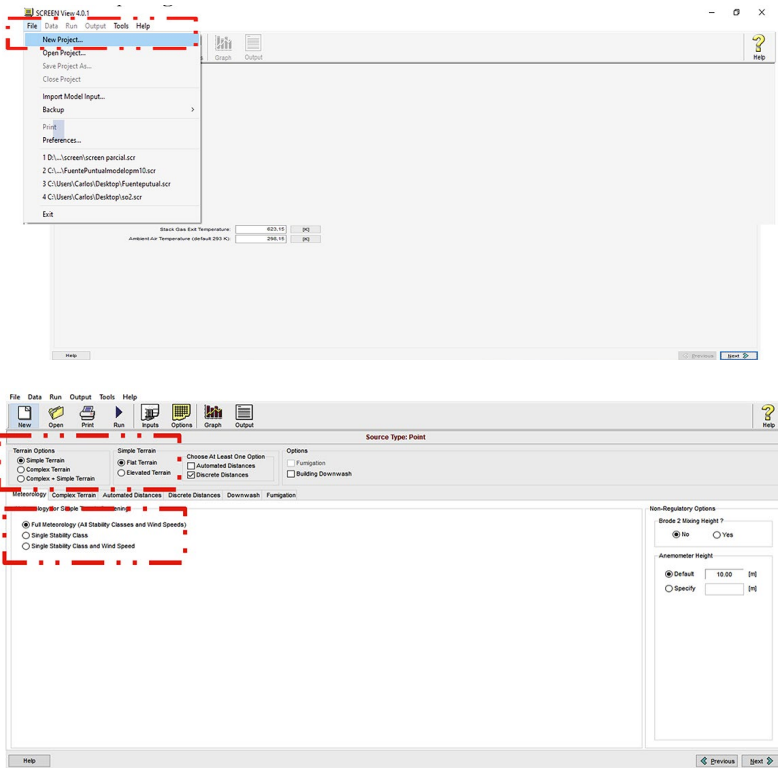
Fuente: Autor

Figura 19. Generación de escenario de modelación



Fuente: Autor

Figura 20. Instructivo para guardar el escenario de modelación



Fuente: Autor

Figura 21. Ingreso de variables al programa

1. Ingrese la distancia del primer receptor

2. Dar Clic en Add

3. Dar Clic en Next

Figura 22. Selección de distancias discretas para la ubicación de receptores

Project Status

Input File: C:\Users\Carlos\Desktop\Ladrillera.in
Output File: C:\Users\Carlos\Desktop\Ladrillera.out

Source Type POINT
Dispersion Coefficient URBAN
Complex Terrain NO
Simple Terrain (FLAT) YES
Automated Distances NO
Discrete Distances YES
Fumigation NO
Building Downwash NO

Your Project is COMPLETE. You Can Run Now !!

Help Input File Details Run Close

A partir de este momento se generan los archivos de salida del escenario de modelación este se caracteriza por salir en formato bloc de notas.

Figura 23. Archivo de salida escenario de modelación en bloc de notas

```

04/13/20
08:13:12
*** SCREEN MODEL RUN ***
*** VERSION DATED 13043 ***

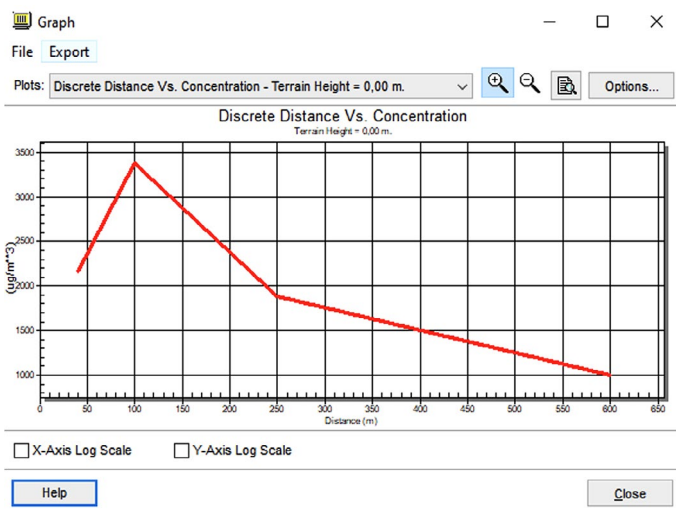
C:\Users\Carlos\Desktop\Ladrillea.acr

SINGLE TERRAIN INPUTS:
SOURCE TYPE          = POINT
EMISSION RATE (g/s)  = 10.0000
STACK HEIGHT (M)     = 13.0000
STE INSIDE DIAM (M)  = 0.4000
STE EXIT VELOCITY (M/S) = 2.5000
STE GAS EXIT TEMP (K) = 623.1500
AMBIENT AIR TEMP (K) = 298.1500
RECEPTOR HEIGHT (M) = 0.0000
URBAN/RURAL OPTION   = URBAN
BUILDING HEIGHT (M)  = 0.0000
MIN HORIZ BLDO DIM (M) = 0.0000
MAX HORIZ BLDO DIM (M) = 0.0000

THE REGULATORY (DEFAULT) MIXING HEIGHT OPTION WAS SELECTED.
THE REGULATORY (DEFAULT) AEROSOL HEIGHT OF 10.0 METERS WAS
ENTERED.

BOUFL. FLOX = 0.511 M**4/S**3;  MON. FLOX = 0.120 M**4/S**
2.
    
```

Figura 24. Dispersión de la pluma



Capítulo 5

Estimación de emisiones fuentes móviles

5.1 Generalidades sobre fuentes móviles

Son las fuentes que, por razón de su uso o propósito, son susceptibles a desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (p. ej.: automóviles, camiones, trenes, barcos o aviones).

5.2 Clasificación de fuentes móviles según tipo de combustible

Las emisiones provenientes de fuentes móviles se generan como resultado del proceso de combustión en los motores de combustión interna. Este proceso puede darse en motores de encendido por chispa (motores ciclo Otto) o de encendido por compresión (motores ciclo diésel). De forma adicional a la clasificación por tipo de combustible, esta se puede realizar en función del tamaño del motor o cilindraje. Teniendo en cuenta los combustibles empleados en Colombia, esta clasificación puede incluir:

- Vehículos a gasolina
- Vehículos operados con combustible diésel/ACPM y sus mezclas
- Dedicados a gas natural o GLP (gas licuado de petróleo)
- Vehículos bi-combustible¹⁰
- Vehículo dual¹¹
- Vehículos híbridos

De manera similar, para los vehículos tipo motocicletas, motociclo y triciclos, se puede emplear una clasificación por tipo de motor: con mezcla de gasolina aceite (dos tiempos), solo gasolina (cuatro tiempos) o en función de la cilindrada de los mismos.

5.3 Clasificación de fuentes móviles según categoría vehicular

Para efectos de la medición de emisiones contaminantes, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013). Resolución 111 de 2013 ha adoptado la clasificación de fuentes móviles por categoría vehicular conforme a los ciclos de prueba de Estados Unidos y de la Unión Europea. De acuerdo con la normativa colombiana, el parque automotor puede clasificarse de acuerdo con la clase de vehículo, el tipo de servicio (publico, oficial, particular, otros), o según su finalidad (transporte de pasajeros o transporte de carga). De acuerdo con la Ley 769 de 2002, la tipología de servicio se define como sigue:

- **Vehículo de servicio particular:** vehículo automotor destinado a satisfacer las necesidades privadas de movilización de personas, animales o cosas.
- **Vehículo de servicio público:** vehículo automotor homologado, destinado al transporte de pasajeros, carga o ambos, por las vías de uso público mediante el cobro de una tarifa, porte, flete o pasaje.
- **Vehículo de servicio oficial:** vehículo automotor destinado al servicio de entidades públicas.
- **Vehículo de servicio diplomático o consular:** vehículo automotor destinado al servicio de funcionarios diplomáticos o consulares.

Tabla 7. Clasificación de las fuentes móviles código nacional de tránsito terrestre

Tipo de uso	Clase de vehículo	Descripción
Pasajeros	Motocicleta	Vehículo automotor de dos ruedas en línea, con Capacidad para el conductor y acompañante
	Mototriciclo	Vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia y capacidad para el conductor y un acompañante del tipo side car y recreativo.
	Antiguo y Clásico	Automotor que haya cumplido 35 años y que conserve sus especificaciones y características originales de fábrica, presentación y funcionamiento.
	Taxi	Vehículo automotor destinado al servicio público individual de pasajeros.
	Buseta	Vehículo destinado al transporte de personas con capacidad de 20 a 30 pasajeros y distancia entre ejes inferiores a 4 metros.
	Microbús	Vehículo destinado al transporte de personas con capacidad de 10 a 19 pasajeros.
	Bus	Vehículo automotor destinado al transporte colectivo de personas y sus equipajes, debidamente registrado conforme a las normas y características especiales vigentes.
	Vehículo de transporte masivo	Vehículo automotor para transporte público masivo de pasajeros, cuya circulación se hace por carriles exclusivos e infraestructura especial para acceso de pasajeros.
	Cuatrimoto	Vehículo automotor de cuatro ruedas con componentes mecánicos de motocicleta, para transporte de personas o mercancías con capacidad de carga hasta 70 kilogramos.
	Moto carro	Vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia, con componentes mecánicos de motocicleta para el transporte de personas o mercancías con capacidad útil hasta 770 kilogramos.

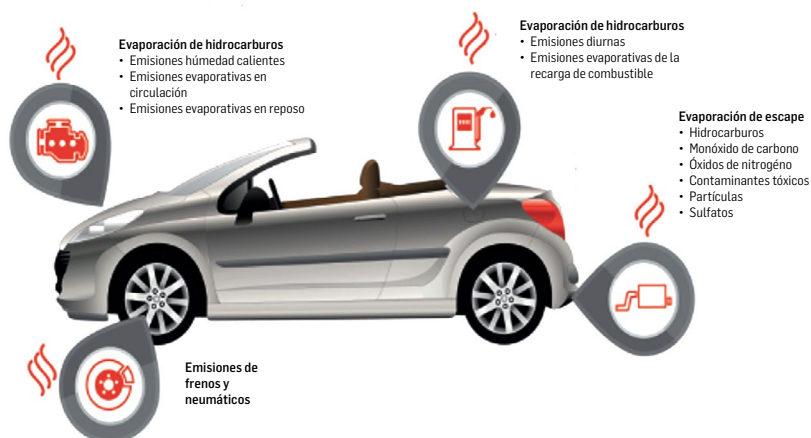
Fuente: Adoptado de Código Nacional de Tránsito Terrestre [CNTT].

Ley 769 de 2002. 6 de agosto de 2002 (Colombia).

5.4 Nivel de detalle de las emisiones

El nivel de detalle en fuentes móviles para la evaluación de emisiones puede incluir: las emisiones del tubo de escape, las emisiones evaporativas del combustible y emisiones generadas por los neumáticos y los frenos.

Figura 25. Tipos de emisiones presentes en las fuentes móviles



Fuente: tomado de Semarnat (2005).

5.5 Métodos de estimación de emisiones vehiculares

El método para calcular las emisiones en las fuentes móviles relaciona el factor de emisión y el factor de actividad. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente), 2017). En este sentido, la ecuación utilizada para estimar las emisiones en fuentes móviles se convierte en:

$$E = F \cdot E_{ijk} \times FA_{jt}$$

Donde:

- E:** Emisiones totales
- $F \cdot E_{ijk}$:** Factor de emisión del contaminante (i) para el vehículo de la categoría vehicular (j), y combustible (k).
- FA_{jt} :** Factor de actividad del vehículo de la categoría vehicular (j), durante el tiempo (t).
- E_{total} :** $E_{total} = E_{Frío} + E_{caliente} + E_{Evaporativa} + E_{desgaste} + E_{Polvo}$
Emisiones totales de un contaminante en partículas en un área determinada.

$E_{\text{Frío}}$: Emisiones durante el funcionamiento del motor térmico transitorio (arranque en frío).

E_{caliente} : Emisiones durante el funcionamiento del motor estabilizado (caliente).

El factor de emisión puede ser obtenido por medición directa a través de analizadores de emisiones de gases utilizados en las pruebas de dinamómetro de chasis, en el caso de vehículos a gasolina y motocicletas, o en un banco de pruebas para motores pesados, en el caso de vehículos a diésel.

También puede ser estimado por balance de masa, haciendo la aplicación inversa de modelos de dispersión en condiciones controladas (túneles vehiculares y camiones urbanos) o por estudios realizados a nivel nacional e internacional, todos estos teniendo en cuenta la categoría vehicular.

De igual forma, el factor de emisión para fuentes móviles simple realiza el cálculo a partir de resultados de concentración obtenidos en las estaciones de medición o ambientes urbanos (p. ej.: calles cerradas, túneles, camiones urbanos o en calles abiertas o autopistas) recogidos por unos receptores.

Los factores de emisión para fuentes móviles pueden ser obtenidos directamente de modelos de emisión o en documentos compilatorios como la *Guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire* de la Agencia Ambiental Europea (EMEP/EEA *Air pollutant emission inventory guidebook*, 2016). Los factores de emisión para fuentes móviles pueden ser consultados en el Capítulo 1.

5.5.1 Método Tier 1:

Es el método más básico y sencillo porque aplica una relación lineal simple entre el factor de actividad y el factor de emisión. El factor de actividad se obtiene generalmente de información estadística, mientras que los factores de emisión de esta categoría han sido escogidos de forma tal que representen las condiciones *típicas* o *promedio* de un proceso, y tienden a ser independientes de la tecnología.

Ejemplo:

Estimar las emisiones de CO y material particulado (MP), para un vehículo que opera con combustible diésel, de cilindrada mayor a 2L, estándar compatible con Euro 2, que durante un día recorre 60 km en un núcleo urbano, a una velocidad promedio de 40km/h.

$$E = F \cdot E_{ijk} \times FA_{jt}$$

$$F \cdot E_{CO} = 3,33 \frac{g CO}{Kg Diésel} \quad F \cdot E_{MP} = 1,10 \frac{g MP}{Kg Diésel}$$

$$E_{CO} = \frac{60 g Diésel}{km} \times \frac{3,33 g CO}{Kg Diésel} \times \frac{1 Kg Diésel}{1000 g Diésel} \times 60 km = 11,99 g CO$$

$$E_{MP} = \frac{60 g Diésel}{km} \times \frac{1,10 g CO}{kg Diésel} \times \frac{1 kg Diésel}{1000 g Diésel} \times 60 km = 3,96 g MP$$

5.5.2 Método Tier 2:

Las emisiones se estiman mediante la ecuación:

$$E = F \cdot E_{ijk} \times FA_{jm}$$

Donde:

Factor de actividad en términos distancia recorrida del vehículo de categoría vehicular (j) y tecnología (m), [km].

Factor de emisión en función de la tecnología vehicular para el contaminante (i), del vehículo de categoría vehicular (j), con tecnología (m), [g/km].

$$F \cdot E_{CO} = 0,296 \frac{g CO}{km} \quad F \cdot E_{MP2,5} = 0,0548 \frac{g MP2,5}{km}$$

Las emisiones estimadas para una distancia recorrida de 60 km corresponden a:

$$E_{CO} = 60km \times \frac{0,296 gCO}{km} = 17,76 g CO$$

$$E_{PM 2,5} = 60km \times \frac{0,0548 gMP2,5}{km} = 3,29 g PM 2,5$$

Capítulo 6

Modelos de dispersión fuentes móviles

6.1 Generalidades modelo gaussiano lineal de dispersión

Para calcular la dispersión de contaminantes sobre el corredor vial en estudio se empleó el modelo para fuente lineal continua de emisión infinita, este considera que las emisiones de sustancias químicamente estables se producen por una sucesión de puntos, lo cual constituye una línea de emisiones y la existencia de un número infinito de puntos de emisión, correspondientes a los tubos de escape de los vehículos.

Este modelo asume la emisión de los contaminantes como una fuente lineal infinita, es decir que existe un flujo constante de vehículos sobre el corredor vial, lo cual significa que a lo largo de ella siempre existe un foco de emisión.

$$C(x, 0) = \frac{2q}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_z v} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

Donde:

C(x, 0): Concentración a nivel del suelo de un contaminante en la dirección del viento, se expresa en ug/m³.

H: Altura promedio de descarga de los contaminantes por los vehículos, se expresa en m.

x: Distancia desde el centro de la vía al punto que se desea determinar la concentración, m.

q: Emisión

- σ_z : Desviación vertical normal, se expresa en m.
 v: Velocidad del viento (m/s).

6.2 Determinación del σ_z o coeficiente dedispersión

$$\sigma_y = aX^b \quad \sigma_z = cX^d + f$$

Las constantes a, c, d y f están en función de la clave de la categoría de estabilidad (Pasquill) y b siempre toma el valor de 0,894; así mismo, x es la distancia de los receptores respecto al corredor vial y debe estar en kilómetros.

Tabla 8. Valores de las constantes para el cálculo de Sigma y, Sigma Z como función de la distancia en la dirección del viento y la condición de estabilidad

Estabilidad	X ≤ 1 km				X ≥ 1 km		
	a	c	D	f	c	d	f
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	-9,6
B	156	106,6	1,149	3,3	108,2	1,098	2
C	104	61	0,911	0	61	0,911	0
D	68	33,2	0,725	-1,7	44,5	0,516	-13
E	50,5	22,8	0,678	-1,3	55,4	0,305	-34
F	34	14,35	0,740	-0,35	62,6	0,180	-48,6

Fuente: Adoptado Martin, D. O. (1976). Comment on "The change of concentration standard deviations with distance." *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26(2), 145-147

6.3 Ejercicio de aplicación determinación del σ_z o coeficiente de dispersión

Usted es contratado como ingeniero sanitario y ambiental para determinar el grado de afección a la calidad del aire en el corredor vial del Centro Comercial Buenavista a la Universidad Pontificia Bolivariana en el sentido norte-sur y sur-norte. Tenga en cuenta que la longitud de la vía es de 3 km.

1. Determine a través de un gráfico la distribución de la flota vehicular y cuál es la que más circula por sentido de la vía.

2. Calcule las emisiones de contaminantes a través del método Tier 2. para cada sentido.
3. De acuerdo con la información meteorológica allegada, determine los niveles de concentración.

Analice la concentración de contaminantes para los receptores tales como Centro Comercial Buenavista, Restaurante La Bonga, Universidad de Córdoba, Colegio Georges Noble, Colegio INEM, Colegio Nuestra Señora de Fátima, paradero de buses Mocarí y la UPB.

Tabla 9. Aforo vehicular sentido UPB-Centro Comercial Buenavista

Hora	Motos	Buses	Busetas	Taxis	Automóviles
1	5	4	5	0	8
2	8	8	8	2	10
3	10	5	10	5	15
4	15	6	12	8	10
5	18	8	14	0	5
6	20	9	10	1	6
7	12	10	8	2	10
8	14	5	5	5	15
9	10	6	10	4	10
10	8	4	12	3	12
11	15	8	15	5	15
12	16	10	20	6	12

Tabla 10. Aforo vehicular sentido Centro Comercial Buenavista - UPB

Hora	Motos	Buses	Busetas	Taxis	Automóviles
1	3	2	4	3	20
2	5	4	8	5	19
3	8	6	12	4	25
4	10	5	15	6	8
5	11	2	10	0	10
6	15	9	9	5	15
7	10	5	8	5	12
8	9	2	7	0	16
9	10	3	6	10	18
10	6	4	10	8	15
11	9	5	10	3	10
12	12	2	8	7	15

Bibliografía

- EPA, A. d. (15 de Agosto de 1996). *MANUALES DEL PROGRAMA DE INVENTARIOS DE EMISIONES*. Obtenido de <https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/files/puntual4.pdf>
- Eurofins. (15 de 07 de 2020). Obtenido de <https://www.eurofins-environment.es/es/modelos-de-dispersion-atmosferica/>
- IDEAM. (Abril de 2007). *Portal Web Instituto de Hidología Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Portal Web Instituto de Hidología Meteorología y Estudios Ambientales: https://www.cornare.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/NORMATIVA/PROTOCOLO_PARA_EL_MONITOREO_Y_SEGUIMIENTO_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE.pdf
- IDEAM. (10 de 2010). *Portal Web IDEAM*. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf
- IDEAM, I. d. (12 de 11 de 2019). *Manual del Observador Meteorológico*. Obtenido de Instituto de Hidología Meteorología y Estudios Ambientales: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/normatividad/m-gdi-m-m003_manual_del_observador_meteorologico.pdf
- IDEAM, I. d. (2022). *Portal Web IDEAM*. Obtenido de Portal Web IDEAM: <https://www.ideam.gov.co/documents/21021/21125/Anexo2.pdf/b70d73c8-2694-49ea-800a-b96d9835dd6d>
- Martin, D. (1 de Febrero de 1976). *Journal of the Air Pollution Control Association 145-147*. Obtenido de Journal of the Air Pollution Control Association 145-147: <https://doi.org/10.1080/00022470.1976.10470238>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . (02 de Septiembre de 2013). Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=111937>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente). (2017). Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/GU%C3%8DA_PARA_LA_ELABORACI%C3%93N_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSF%C3%89RICAS.pdf

- Rama Legislativa. (13 de Septiembre de 2002). *Ley 769 de 2002*. Obtenido de https://www.oas.org/juridico/spanish/mesicic2_col_ley_769_2002.pdf
- Sostenible, M. d. (2022). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- Territorial, M. d. (Octubre de 2010). *Portal Web Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial*. Obtenido de Portal Web Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo-Fuentes-Fijas.pdf>
- Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla. (7 de Junio de 2020). Obtenido de <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Tema2.pdf>



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.
La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.

Para darnos su opinión, comuníquese vía correo electrónico a editorial@upb.edu.co

Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación,
su nombre, correo electrónico y número telefónico.



La guía didáctica sobre contaminación atmosférica, elaborada para el programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana (seccional Montería), ofrece un conjunto de ejercicios, procedimientos y tutoriales orientados a fortalecer las competencias de los estudiantes en la identificación, estimación y modelación de emisiones contaminantes. El material aborda conceptos básicos de cálculo y conversión de unidades, balances de masa, factores de emisión, elaboración de rosas de vientos, y aplicación de modelos de dispersión para fuentes fijas y móviles. Se incluyen instrucciones para el uso de software especializado (WRPLOT View y SCREEN View), así como metodologías para la estimación de emisiones vehiculares bajo diferentes enfoques (Tier 1 y Tier 2). El enfoque combina fundamentos teóricos con ejemplos prácticos y problemas resueltos, fomentando la aplicación de herramientas técnicas para el diagnóstico y control de la calidad del aire.

