

CAPÍTULO 4

Modelos de dispersión de contaminantes en aire

Laura Massolo y German Castagnasso

Resumen: Los modelos de dispersión de contaminantes en aire son ampliamente utilizados para evaluar el impacto de los contaminantes emitidos por diversas fuentes sobre la calidad del aire. En esta sección se hará una descripción de las ecuaciones que gobiernan el uso de modelos de dispersión de contaminantes en aire. Se explicarán conceptos básicos de meteorología y de la dispersión de los contaminantes en dicho compartimento, así como también las características del medio emisor y receptor.

Introducción

Los modelos de dispersión de contaminantes en aire consisten en la representación matemática de los procesos de transporte, transformación y remoción de los contaminantes emitidos por una determinada fuente permitiendo observar y estimar concentraciones en un receptor seleccionado viento abajo (USEPA, Air Quality Dispersion Modeling, 2022). En tal sentido, son ampliamente utilizados para evaluar el impacto de los contaminantes emitidos por diversas fuentes sobre la calidad del aire. Para poder realizar una aplicación exitosa de los mismos, es necesario comprender conceptos básicos de meteorología, topografía, áreas de sensibilidad como así también las ecuaciones que los gobiernan. En este capítulo, proporcionamos una descripción general de estos conceptos.

En primer lugar, debemos definir que entendemos por contaminación del aire. De las diferentes definiciones que se pueden encontrar en la bibliografía citaremos en este libro la que da en Argentina la Provincia de Buenos Aires en su Decreto 1074/18: “Presencia en la atmósfera exterior de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en concentración y con tal duración y frecuencia de ocurrencia que puedan afectar a la propiedad, a la vida humana, animal, o vegetal, que interfiera el goce de la vida o el ejercicio de actividades”

En ese contexto, para evaluar cuál es el aporte de las emisiones de contaminantes atmosféricos de las fuentes en los sitios receptores de interés podemos seguir distintos caminos como se muestra en la figura 6.1.

Los monitoreos en calidad de aire son una medida directa del impacto de los contaminantes. Entre estos, las estaciones de monitoreo continuo serían de elección para tener una media precisa y sostenida en el tiempo sobre todo para aquellos contaminantes con límites de legislación anuales, pero no siempre es posible contar con dichas mediciones debido a sus extremados

costos de adquisición y mantenimiento. Para contaminantes con límites de legislación más cortos, por ejemplo 24 horas, se puede recurrir a monitoreos manuales, pero también tienen sus dificultades a la hora de instalar un equipo en un sitio sin medidas de seguridad y además captan las emisiones de un contaminante determinado de distintos generadores a la vez por lo cual permiten dilucidar cual o cuales son los mayores aportes sobre la calidad del aire. En tal sentido, vemos que la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes resulta una herramienta sumamente útil para la evaluación del impacto de las emisiones sobre la calidad del aire provenientes de distintos generadores, permitiendo discriminar la procedencia de los mismos como así también evaluar largos periodos de tiempo a partir de mediciones en conductos de emisión o sectores areales y/o volumétricos.

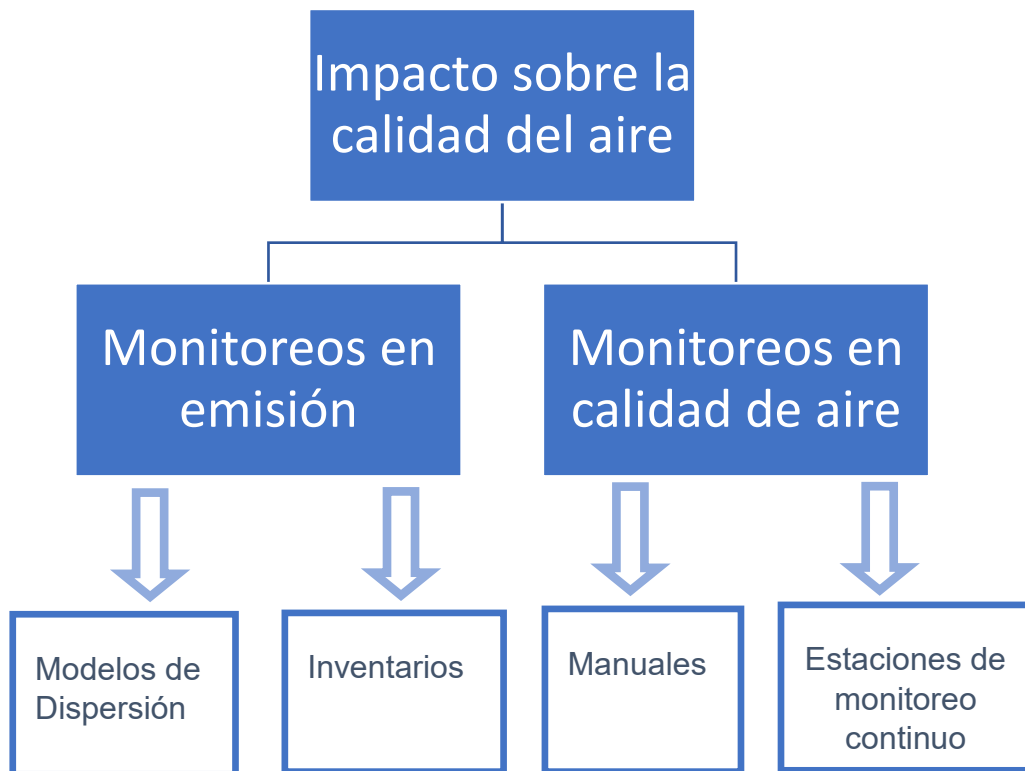


Figura 4.1: Evaluación del impacto sobre la calidad del aire

Dispersión de contaminantes en aire

Una vez que los contaminantes se vierten a la atmósfera tiene lugar su dispersión. Influye en forma decisiva en los niveles de inmisión y por lo tanto en el grado de contaminación a que se ven sometidos los componentes de la biosfera. En la atmósfera se producen reacciones fotoquímicas, generación de radicales libres y agentes oxidantes que van a contribuir en la formación de ozono y compuestos orgánicos volátiles en presencia de óxidos de nitrógeno como así también la formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico que contribuyen a la lluvia ácida. También es importante tener en cuenta el grado de estabilidad atmosférica y los fenómenos de inversión térmica.

En tal sentido a la hora de evaluar la dispersión de los contaminantes y su impacto hay que tener en cuenta tres componentes clave como se muestra en la figura 6.2:

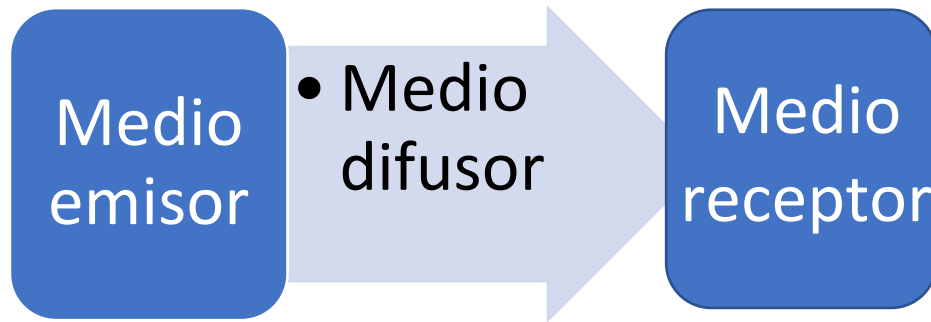


Figura 4.2: componentes clave en la evaluación del impacto sobre la calidad del aire

Medio emisor

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera pueden provenir de fuentes fijas y/o móviles. En primer lugar, debemos definir qué tipo de emisiones queremos modelar ya que existen diversos modelos dependiendo de que se trate de fuentes fijas o móviles y para ambos casos debemos conocer una serie de datos que servirán de alimentación al modelo.

En el caso de fuentes fijas un resumen de los datos requeridos según los distintos tipos de fuentes se muestra en la figura 4.1.

Tipo de emisiones	Datos de emisión	Otras variables
<ul style="list-style-type: none"> • Puntuales • Difusas • Fugitivas • Areales 	<ul style="list-style-type: none"> • Lecturas directas • Medidas indirectas • Medidas teóricas 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de salida • Caudal de emisión • Velocidad de salida

Tabla 4.1: resumen de datos requeridos para fuentes fijas según el tipo de fuente

Medio difusor

Se entiende por medio difusor a la atmósfera en la cual se dispersan los contaminantes en función de la velocidad y dirección del viento como así también de los distintos tipos de atmósfera. Cabe aclarar que siempre que hablamos de atmósfera en este capítulo nos referimos a zonas de la tropósfera que es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre.

En tal sentido, podemos encontrar distintos tipos de estabilidad atmosférica enumeradas en la figura 6.3 según las clases de estabilidad propuestas por Pasguill y Gifford que describiremos más adelante.

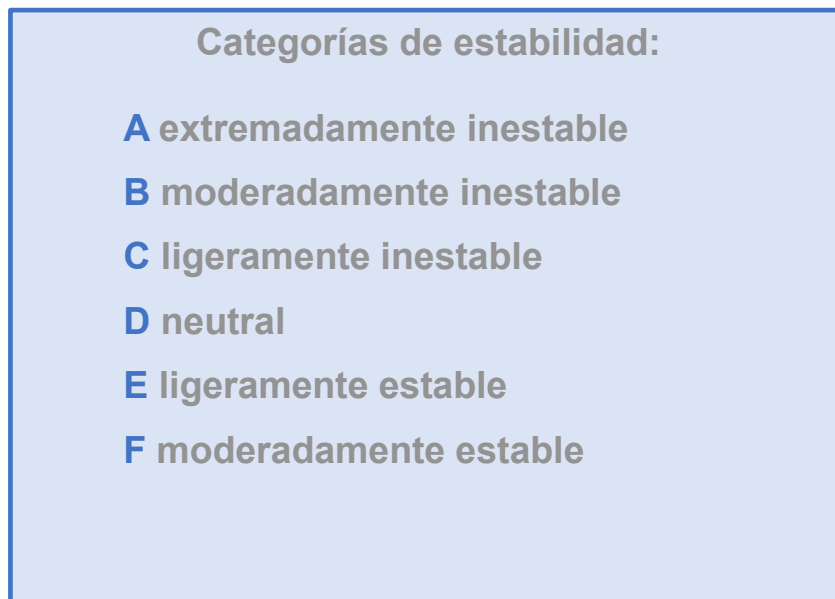


Figura 4.3: categorías de estabilidad atmosférica

Medio receptor

El medio receptor está definido por el sitio donde se encuentran los valores máximos de contaminantes a nivel del suelo provenientes de una o varias fuentes estudiadas luego de su dispersión en la atmósfera.

En la tabla 6.2 se resumen algunos conceptos a tener en cuenta de este medio referido al entorno a estudiar y la posible presencia de áreas de sensibilidad.

Entorno a estudiar	Áreas de sensibilidad
<ul style="list-style-type: none"> • Urbano • Rural • Radio de cobertura • Altura 	<ul style="list-style-type: none"> • Escuelas • Hospitales • Residencias de ancianos • Sitios de vulnerabilidad

Tabla 4.2: resumen de datos requeridos del medio receptor

Fenómenos que inciden en la dispersión de contaminantes

Los principales factores que influyen en la dispersión de los contaminantes son los climáticos y topográficos. Dentro de los climáticos podemos mencionar velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa, radiación solar, nubosidad. Dentro de los topográficos tendremos en cuenta la presencia de espejos de agua, montañas y laderas, edificios cercanos, entre otros (Ayllon, 2003).

Factores climáticos

Los datos meteorológicos utilizados en los modelos de dispersión de contaminantes corresponden a datos de superficie y datos de altura. Estos últimos podrán requerirse o no dependiendo del tipo y la complejidad del modelo utilizado. Ambos datos juegan un papel importante ya que afectan la dispersión de los contaminantes y por ende la concentración de los mismos en los receptores de interés.

Los datos de superficie se miden directamente con distintos instrumentos a nivel de la superficie terrestre e incluyen temperatura, dirección y velocidad del viento, cobertura de nubes, visibilidad, punto de rocío y cantidad de precipitación. Los datos de altura se miden en las capas verticales de la atmósfera (USEPA, Air Modeling - Observational Meteorological Data, 2022).

Haremos una breve descripción de alguno de ellos y su influencia en las clases de estabilidad atmosférica

Viento

El viento es el elemento básico en la circulación general de la atmósfera. Es el movimiento del aire en la atmósfera, que se desplaza desde las zonas de altas presiones a las de bajas presiones. En la zona cercana a la superficie terrestre, la velocidad del viento aumenta con la

altura mientras que la carga de fricción disminuye. Esa variación normalmente tiene un perfil logarítmico interesando conocer su velocidad media. La turbulencia atmosférica hace que la velocidad del viento pueda cambiar muy rápidamente. Debe tratarse como un vector por lo cual debemos conocer su magnitud, dirección y sentido. La velocidad se mide con un anemómetro, habitualmente en m/s o km/h. La dirección se mide mediante una veleta

Las diferentes zonas geográficas están sometidas a algún viento predominante. En tal sentido, la rosa de los vientos es una herramienta utilizada para conocer la dirección, frecuencia e intensidad del viento. Se realiza haciendo un tratamiento estadístico de los datos teniendo en cuenta datos de 5 o más años. Nos va a proporcionar información desde donde sopla el viento y va a ser representativa de cada lugar geográfico. En la figura 6.4 se muestra un ejemplo de una rosa de los vientos en donde se pueden visualizar la frecuencia dada en porcentajes, la velocidad en m/s y la dirección predominante del viento. Hay distintos programas para confeccionar rosas de los vientos, algunos de ellos se pueden descargar gratuitamente de sitios web como ser el WRplot mediante el cual fue confeccionada la siguiente rosa de vientos para la ciudad de Mar del Plata periodo 2017.

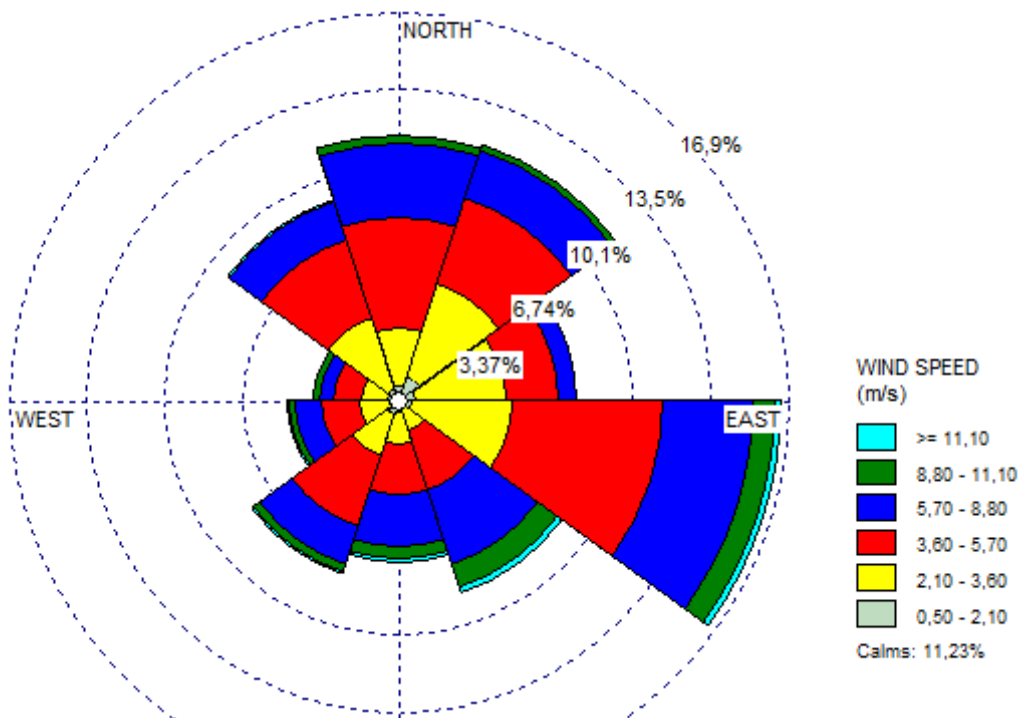


Figura 4.4: Diagrama de la rosa de los vientos.

Temperatura

La temperatura sufre el fenómeno de estratificación atmosférica en las distintas capas de la atmósfera. En la troposfera, en una situación cercana al estado adiabático la temperatura disminuye con la altura a medida que se asciende a razón de 10°C por Km pero en situaciones normales la turbulencia de la atmósfera generará distintos estados de estratificación atmosférica. Esta estratificación atmosférica cambia a lo largo del día porque la atmósfera es variable

y por lo tanto su temperatura vertical. Condiciones atmosféricas inestables favorecen la mezcla y por lo tanto la dispersión de los contaminantes mientras que condiciones estables generan el efecto contrario.

En condiciones de viento calma y el fenómeno de inversión térmica que en el invierno puede persistir durante gran parte del día; los contaminantes emitidos en la capa invertida quedan atrapados, se acumulan y dispersan lentamente (García M, 2014).

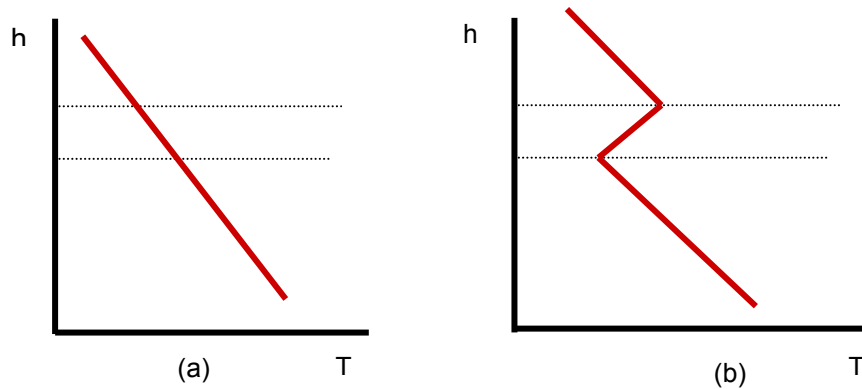


Figura 4.5: variación de la temperatura con la altura (a) condiciones normales, (b) inversión térmica

Nubosidad

La nubosidad es la fracción del cielo cubierta por nubes observada en un lugar determinado. Se mide en octavos. Va desde 0/8 hasta 8/8 dividiendo el cielo en 8 partes:

- 0/8 indica un cielo completamente despejado
- 4/8 la mitad del cielo cubierto
- 8/8 para un cielo completamente cubierto.

Clases de estabilidad atmosférica

Como mencionamos anteriormente, la capacidad de dispersión o dilución de los contaminantes es función de la turbulencia que, bien de origen térmico como mecánico, posibilita una mayor o menor dispersión, Para definir de manera operativa esta capacidad es útil trabajar con el concepto de estabilidad atmosférica y su definición cualitativa como es el de categoría de estabilidad (Paquill, 1962) (Pasquill F, 1983).

Pasquill y Gifford definieron seis categorías de estabilidad atmosférica en función de distintos parámetros, principalmente la velocidad del viento, nubosidad y flujo neto de radiación solar que llega a la tierra. El método permite asociar a cualquier situación atmosférica, alguna de las seis categorías como se muestra en la tabla 6.3 de la A a la F en donde A corresponde a una atmósfera muy inestable, B moderadamente inestable, C levemente inestable, D neutra, E levemente estable y F estable (Resolución 559/19, 2022).

Velocidad del viento a 10 m del suelo	Insolación (*)			Noche (**)	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Cobertura nubosa	Cobertura nubosa
				>4/8	<3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

*Las unidades de radiación solar se expresan en cal/cm^2 (Langley) o en Wh/m^2 , donde $1 \text{ cal}/\text{cm}^2 = 0,0116 \text{ kWh}/\text{m}^2$
 **La noche se define como el período desde una hora después de la puesta del sol, hasta una hora antes de la salida de este. (Porta, 2016)

Tabla 4.3: Categorías de estabilidad de Pasquill y Gifford

Las categorías de estabilidad de Pasquill- Gifford aunque presentan las desventajas de cualquier tratamiento discontinuo de un fenómeno natural, siguen utilizándose profusamente dado que hay un gran número de correlaciones de parámetros atmosféricos basados en ellas, y son una solución de compromiso cuando no se dispone de sistemas de medida que proporcionen información más concreta sobre estos parámetros (por ejemplo, la turbulencia atmosférica).

Capa de mezcla

La capa de mezcla puede interpretarse como el espesor de la atmósfera en que se dispersan (se mezclan) los contaminantes. Corresponde a la capa más baja de la atmósfera y está influenciada por parámetros atmosféricos entre los cuales podemos mencionar:

- Magnitud y dirección del viento
- Temperatura
- Presión
- Radiación solar
- Turbulencia (movimientos complejos donde intervienen la mayor parte de los parámetros anteriores)

Es importante determinar su altura ya que de ella dependerá el grado de dispersión de los contaminantes en un lugar geográfico determinado y a distintas horas del día. Por lo tanto, la caracterización de la capa límite atmosférica se considera un insumo muy importante para la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes haciendo que su importancia trascienda la aplicación netamente en el ámbito científico para convertirse en un problema estrechamente relacionado con la gestión ambiental (Zhang, 2014)

Para el cálculo de la altura de capa de mezcla se pueden utilizar distintas metodologías:

- Determinación basada en los datos correspondientes a los perfiles de temperatura en función de la altura que se miden a través de radio sondeo
- Utilización de ceilómetros
- Radar perfilador de vientos
- Radiómetro microondas
- Cálculos mediante fórmulas matemáticas (cuando no existen datos de estaciones de altura)

Cálculo mediante radio sondeo

Los sistemas de radio sondeos están compuestos por un conjunto de sensores e instrumentación electrónica llamada radiosonda que se sujeta a un globo de helio. Toma medidas de presión, temperatura, humedad de la atmósfera y geolocalización a medida que este asciende, conformando perfiles de alta resolución (Mejía, 2015).

En muchas ocasiones resulta difícil obtener datos de radio sondeo sobre todo cuando es necesario contar con datos oficiales de un determinado país o provincia. Existen redes de datos de distintos lugares del mundo que se pueden consultar en sitios web. Un ejemplo es *The Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA)*. La misma consta de observaciones de radiosondas de más de 2.800 estaciones distribuidas globalmente. Los datos más antiguos datan de 1905 y los datos más recientes están disponibles casi en tiempo real desde unas 800 estaciones en todo el mundo (NOAA, 2022).

Cálculo mediante fórmulas matemáticas: en base a la velocidad de fricción, parámetro de Coriolis y longitud de Monin Obukhov (Resolución 559/19, 2022)

Se utilizan las siguientes expresiones según los casos:

- Para condiciones atmosféricas estables $h = \alpha u / f$
- Para condiciones atmosféricas inestables $h = (\alpha u / f) - (u / [f L])^{1/2}$

donde:

h = altura de la capa de mezcla.

u = velocidad de fricción = $(0,4 u_{ref}) / \ln (z_{ref} / z_0)$

u_{ref} y z_{ref} = velocidad y altura de medición del viento

L = longitud de Monin-Obukhov.

α = parámetro igual a 0,35

f = valor absoluto del parámetro de Coriolis = $2 \omega \sin \varphi$

ω = velocidad de rotación terrestre

φ = latitud del lugar

Factores topográficos

Es importante tener en cuenta los factores topográficos ya que los rasgos del terreno afectan sobre todo el flujo del aire relativamente cercano a la superficie terrestre. Entre ellos cabe mencionar el efecto del mar, montañas y laderas y efectos urbanos.

Efecto del mar: durante el día la tierra está más caliente que el agua y durante la noche sucede lo contrario. Por lo tanto, el flujo de aire se moverá desde la tierra hacia el mar durante el día y desde el mar hacia la tierra durante la noche.

Efecto de montañas y laderas: durante la noche los cerros y montañas producen flujos de vientos descendentes porque el aire es más frío en grandes elevaciones. Durante el día sucede lo contrario.

Efectos urbanos: Cuando el sol se pone, el área urbana continúa irradiando calor desde los edificios, las superficies pavimentadas, etc. El aire que este complejo urbano calienta asciende y crea un domo sobre la ciudad. Este fenómeno se llama *efecto de la isla calórica*. La ciudad emite calor durante toda la noche.

Modelos de dispersión de contaminantes en aire

Los modelos de dispersión de contaminantes en aire son una representación matemática de los procesos de transporte, transformación y remoción de los contaminantes del aire. Permiten calcular el impacto de las emisiones sobre la calidad del aire.

El modelo elegido deberá predecir con certeza las concentraciones que resultarían de las emisiones de contaminantes durante un tiempo estipulado de acuerdo con las condiciones meteorológicas reinantes y los factores topográficos del sitio estudiado.

Objetivos de la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes en aire

Los modelos de dispersión de contaminantes en aire son una herramienta de gestión ambiental útil para el análisis y estudio de distintas situaciones tales como:

- Evaluaciones de impacto ambiental
- Estudio de emisiones y calidad del aire provenientes de un determinado generador
- Identificación de focos de emisión y potenciales problemas
- Localización de áreas sensibles y áreas contaminadas como herramientas para el ordenamiento territorial.
- Cálculo de alturas de chimenea para mejorar la dispersión de los contaminantes
- Elaboración de inventarios de emisiones.
- Diseño de planes de acción y planificación de medidas de mitigación.

Los organismos de gestión cada vez más utilizan los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos para evaluar la viabilidad de los proyectos de instalaciones potencialmente generadoras de contaminantes de la atmósfera, evaluar instalaciones en actividad, otorgar licencias de emisión y establecer las medidas correctoras que sean necesarias. También son utilizados por

consultoras privadas y empresas y en numerosos proyectos de investigación en el marco de los objetivos enunciados anteriormente.

Clasificación de modelos de dispersión de contaminantes en aire

Se pueden clasificar en dos grandes grupos: matemáticos y físicos como se muestra en la figura 4.6

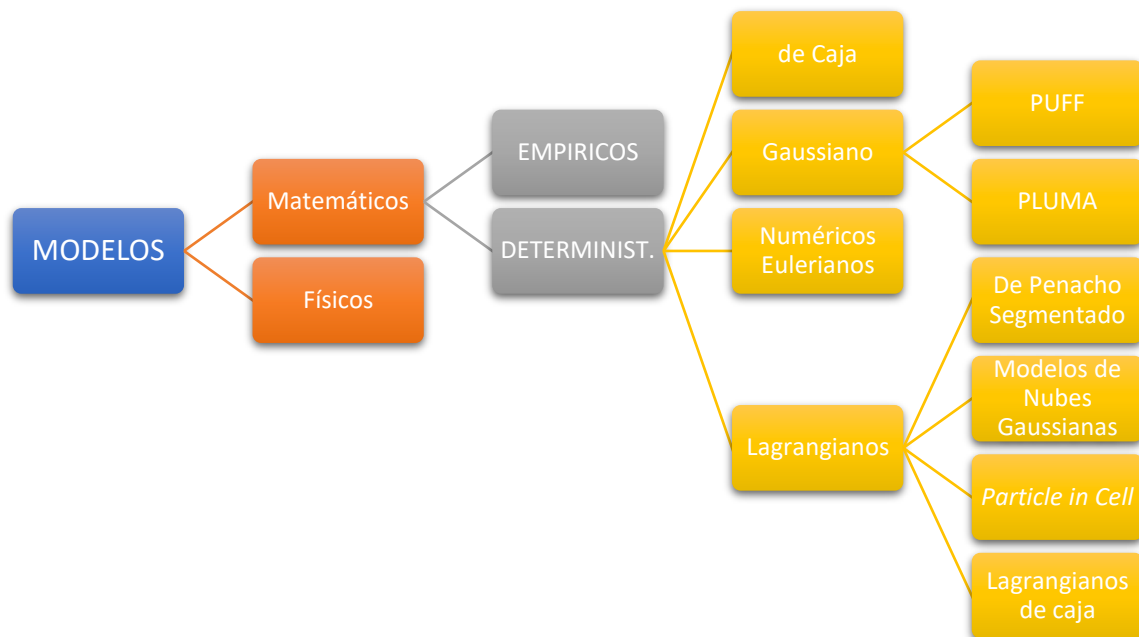


Figura 4.6: clasificación de modelos de dispersión de contaminantes en aire

Modelos físicos

Consisten en representaciones a pequeña escala de la dispersión atmosférica. Un ejemplo de los mismos, es el túnel del viento que consiste en una herramienta experimental para estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos.

El objetivo principal de un túnel de viento es recrear de la manera más parecida a la realidad las condiciones de viento sobre la superficie terrestre, o sea la baja capa límite atmosférica, que es de tipo turbulenta, cuando sopla el viento.

En este tipo de túneles se puede estudiar qué pasa cuando el viento golpea sobre diferentes cuerpos, como rotores de generadores eólicos, edificios, aviones, puentes grúas, o cualquier tipo de estructura. Cuantos mayores sean las dimensiones del túnel, mejor se recrearán las turbulencias relacionadas con la realidad.

Consiste en una de las mejores técnicas y la más aproximada a la realidad, sin embargo, es poco utilizada por los recursos necesarios para ejecutar este tipo de modelos. Además, cabe destacar que los modelos matemáticos poseen una mayor versatilidad.

Modelos matemáticos

Están constituidos por un conjunto de ecuaciones algebraicas y/o diferenciales, que describen los aspectos físicos y químicos de la situación a evaluar. En algunos casos tienen una solución analítica y en otros casos hay que recurrir a una solución numérica en elementos finitos. Dentro de ellos, los modelos determinísticos tratan de establecer alguna formulación matemática que describa el transporte y dispersión de los contaminantes en el aire relacionando las emisiones con los niveles de inmisión (Porta, 2016).

Podemos hacer la siguiente clasificación:

- **Modelos de caja:** asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente e instantáneamente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas (celda única).
- **Modelos gaussianos:** consideran que la pluma emitida sigue una distribución gaussiana perpendicular al movimiento convectivo principal. Son los más utilizados para resolver problemas locales.
- **Modelos lagrangianos:** los contaminantes están representados por elementos de tamaño diverso (nubes, segmentos o partículas), que son transportados y dispersados por el viento de una forma independiente. Utilizan coordenadas de Lagrange ligadas a la trayectoria
- **Modelos eulerianos:** utilizan un sistema de referencia absoluto y tratan de estimar la dispersión referida a este sistema mediante distintas soluciones de integración numérica

El modelo de elección dependerá del escenario a modelar ya que un modelo podría funcionar mejor que otro para un determinado estudio, sin embargo, los resultados se pueden invertir en un escenario diferente. Por lo tanto, la elección del modelo depende del entorno, el tipo de fuentes de emisión y del tiempo requerido.

Modelos gaussianos

A pesar del gran número de hipótesis simplificadoras que conducen a la ecuación Gaussiana y a las limitaciones inherentes de estos modelos, ellos son útiles si se desea conocer la distribución probabilística de las concentraciones en un determinado lugar, causadas por una determinada fuente y modulada su distribución por las condiciones meteorológicas predominantes. Son

los modelos más utilizados en la gestión de la contaminación del aire por su simpleza y cortos tiempos de ejecución comparado con otros modelos más sofisticados.

Ecuación gaussiana

La concentración de la pluma, en cada distancia vientos abajo, posee una distribución Gaussiana o normal independiente horizontal y verticalmente como se muestra en la figura 6.7. En dicha figura podemos observar parámetros como la altura efectiva de la chimenea (H_{ef}) que se define como la altura media del transporte de la pluma; H_s , como la altura de emisión, ΔH como la elevación de la pluma, Q es el caudal másico y u es la velocidad del viento

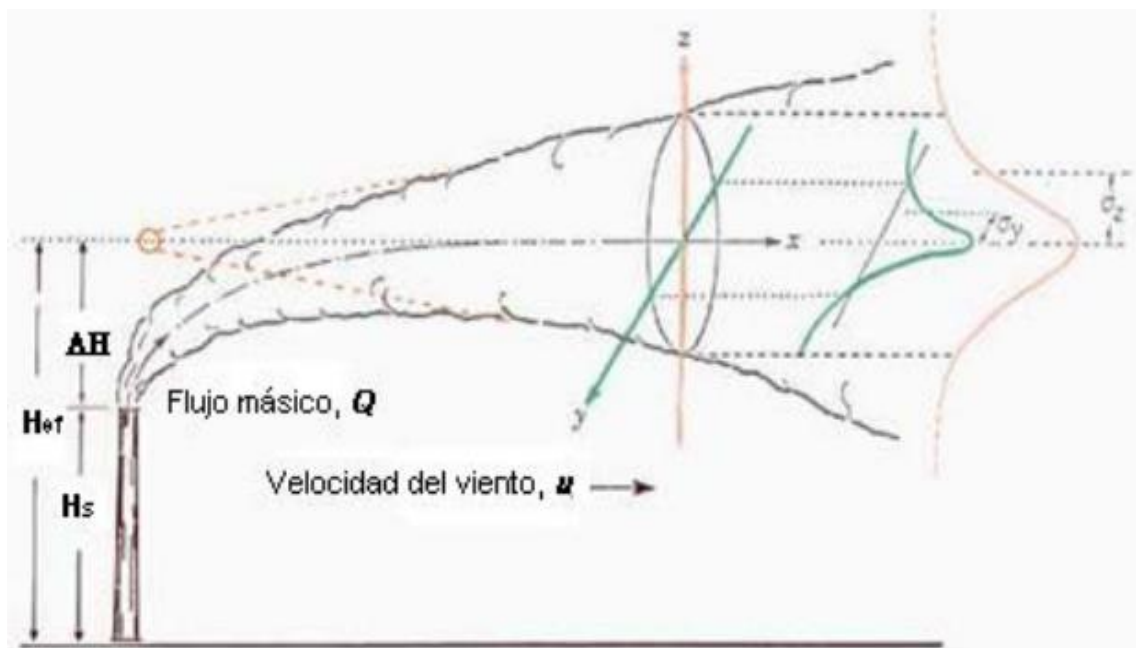


Figura 4.7: Esquema de una pluma gaussiana

Los modelos gaussianos se basan en hipótesis relativamente sencillas:

- Gases no reactivos. Aerosoles $<20 \mu\text{m}$
- Dispersión isotrópica
- Dispersión pasiva
- Fuente puntual
- Terreno plano
- Condiciones estacionarias.
- El vector velocidad del viento es constante en magnitud y dirección.
- Los parámetros de dispersión se asumen independientes de la altura.

La ecuación matemática asociada al modelo gaussiano asumiendo que el suelo no es un sumidero, sino que refleja los contaminantes que llegan, tiene la siguiente expresión:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \left\{ e^{-\left(\frac{(z-H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{-\left(\frac{(z+H_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right\}$$

Donde:

C: concentración del contaminante [g/m³]

x: distancia del receptor a sotavento [m] → Indirectamente en los coef. dispersión.

y: distancia del receptor, perpendicular al eje de simetría de la pluma [m]

z: altura del receptor [m]

Q: tasa de emisión [g/s]

u: velocidad del viento a la altura de la emisión [m/s]

H_{ef}: altura efectiva de la chimenea [m]

σ_y, σ_z: coeficientes de dispersión lateral y vertical

Velocidad del viento a la altura de emisión

El viento varía significativamente con la altura en la zona cercana a la superficie terrestre lo cual está relacionado con la fricción. Cualquier obstáculo como árboles o arbustos tendrán una influencia significativa.

Para calcular la velocidad del viento a la altura de emisión se utiliza la ley de potencias para ajustar la velocidad del viento de referencia U_{ref} observada a una altura de medición referencia Z_{ref} hasta la altura de emisión h_s de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U = U_{ref} \left(\frac{h_s}{Z_{ref}} \right)^p$$

Donde p es el exponente del perfil del viento.

Los valores de p pueden calcularse en función de la clase de estabilidad atmosférica y de la rugosidad dada por el entorno urbano o rural según lo expresado en la tabla 6.4

Clase de Estabilidad	p	
	Rural	Urbano
A	0,07	0,15
B	0,07	0,15
C	0,10	0,20
D	0,15	0,25
E	0,35	0,30
F	0,55	0,30

Tabla 4.4: valor de p expresando el exponente del perfil del viento.

Altura efectiva de la chimenea

Los gases calientes que salen de chimeneas, hornos y de otros procesos de combustión tienden a elevarse por efecto del empuje térmico, originando un aumento de la altura efectiva del penacho H_{ef} . Es necesario que esta sobreelevación sea suficiente para que los contaminantes sean dispersados. La elevación del penacho Δh se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente. Esta elevación está originada por la fuerza ascensional y el impulso vertical del efluente.

La altura efectiva del penacho se calcula según la siguiente ecuación:

$$H_{efec} = H_{chim} + \Delta h$$

Para calcular la altura del penacho existen diversas ecuaciones. Entre las mismas se puede utilizar las ecuaciones de Holland:

Donde:

$$\Delta H = \frac{v_s \cdot d_s}{u_s} \cdot \left[1.5 + 2.68 \cdot 10^{-3} \cdot P_a \cdot \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \cdot d_s \right]$$

v_s : velocidad de salida de los gases [m/s]

d_s : diámetro de la chimenea [m]

u_s : velocidad del viento a la altura de la emisión [m/s]

P_a : presión atmosférica [hPa]

T_s : temperatura de salida de los gases [K]

T_a : temperatura ambiente [K]

Coefficientes de dispersión

Los coeficientes de dispersión se definen como las desviaciones estándar vertical y horizontal, que determinan la forma de la curva de Gauss y dependen de la estabilidad atmosférica. En cada categoría de estabilidad atmosférica, se utiliza una función de variación de σ_y con la distancia a la fuente emisora y otra función para σ_z .

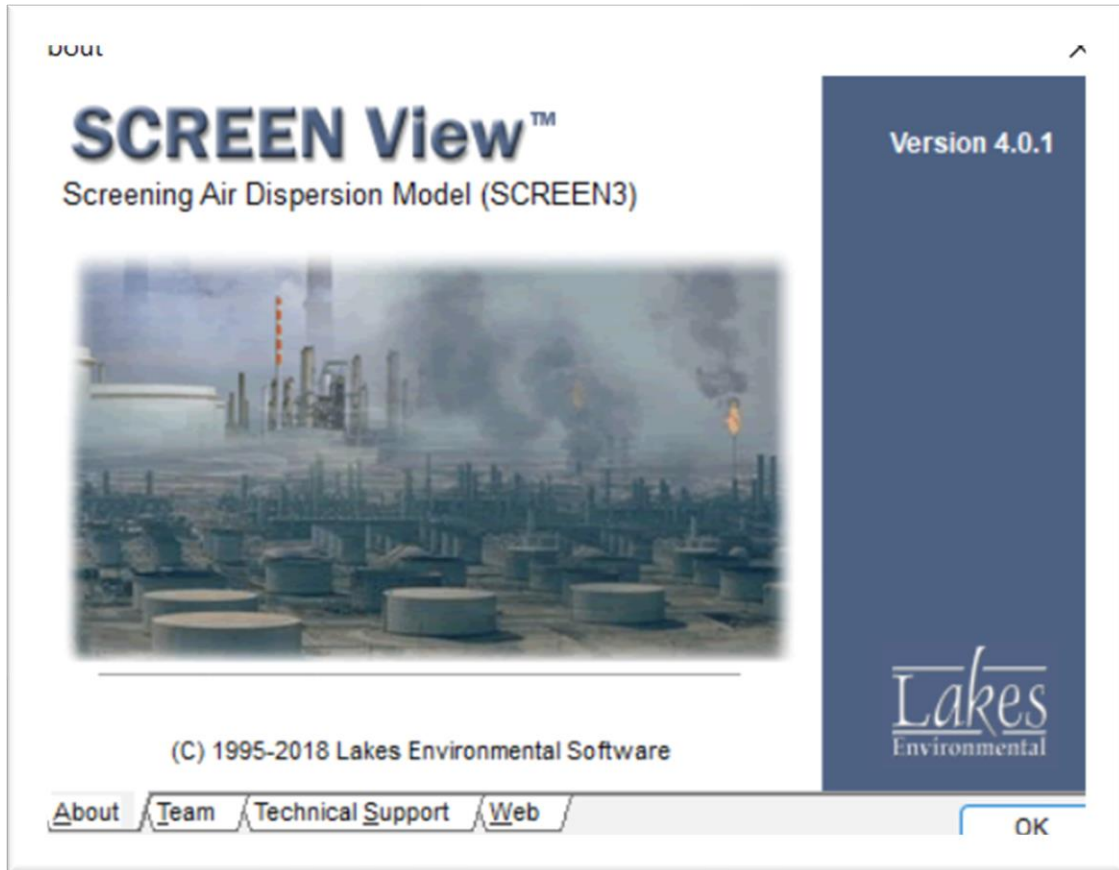
Aplicaciones de modelos gaussianos

Existen dos opciones básicas, de acuerdo al criterio de la Agencia Ambiental de Estados Unidos USEPA, modalidad de *screening* o barrido y modelación detallada (USEPA, Air Quality Dispersion Modeling, 2022)

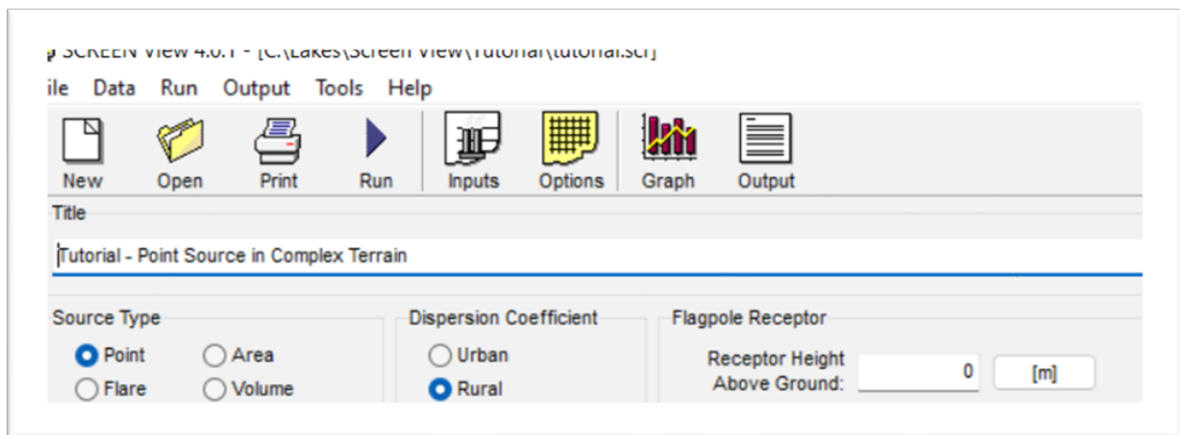
Modelación mediante modalidad screening

Daremos un ejemplo de ejecución utilizando el modelo de versión gratuita *Screen View* (Lakes ambiental, s.f.):

1. Apertura del modelo SCREEN VIEW V4.0.1 versión para Windows:



2. Selección de tipo de fuente a modelar como Puntual, Areal, volumétrica o de tipo Antorcha. Selección de tipo de coeficiente de dispersión (Urbano o Rural) y altura de receptor.



3. Selección de Parámetros de emisión de la fuente puntual

Point Source Parameters

Emission Rate:	100	[g/s]
Stack Height:	100	[m]
Stack Inside Diameter:	2.5	[m]
Stack Gas Exit	Velocity	25 [m/s]
Stack Gas Exit Temperature:	450	[K]
Ambient Air Temperature (default 293 K):	293	[K]

4. Opciones de selección de Terreno (simple, complejo o mixto) , plano o elevado .

Terrain Options

Simple Terrain
 Complex Terrain
 Complex + Simple Terrain

Flat Terrain
 Elevated Terrain

Choose At Least One Option

Automated Distances
 Discrete Distances

Options

Fumigation
 Building Downwash

Meteorology | **Complex Terrain** | Automated Distances | Discrete Distances | Downwash | Fumigation

Diagram labels: Complex, Elevated, Stack Height, Stack

5. Selección de matriz meteorológica como meteorología completa, selección de una clase de estabilidad predeterminada o selección de clase de estabilidad incluyendo la selección de la velocidad del viento. Además de incluir el cálculo de la altura de capa mezcla y definición de la altura del anemómetro sobre el cual fueran realizadas las determinaciones de la velocidad del viento para el caso de análisis.

Meteorology for Simple Terrain Screening

Full Meteorology (All Stability Classes and Wind Speeds)
 Single Stability Class
 Single Stability Class and Wind Speed

Stability Class: A - Very Unstable

10-Meters Wind Speed: [] [m/s]

Wind Speed Range: 1.0 to 3.00 [m/s]

Non-Regulatory Options

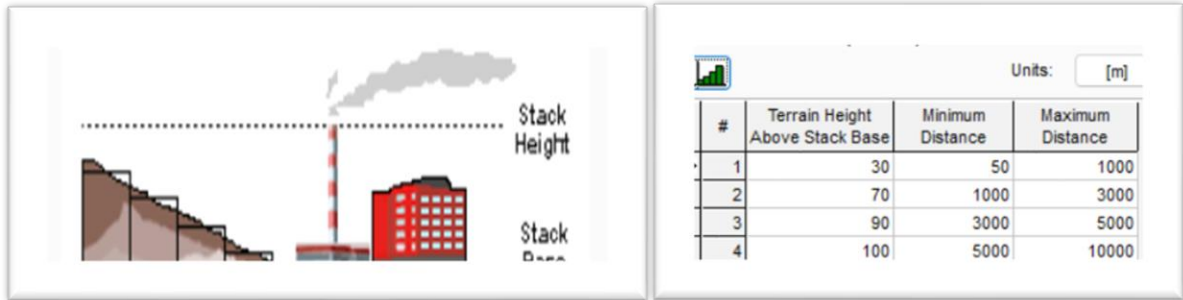
Brode 2 Mixing Height ?

No Yes

Anemometer Height

Default 10.00 [m]
 Specify [] [m]

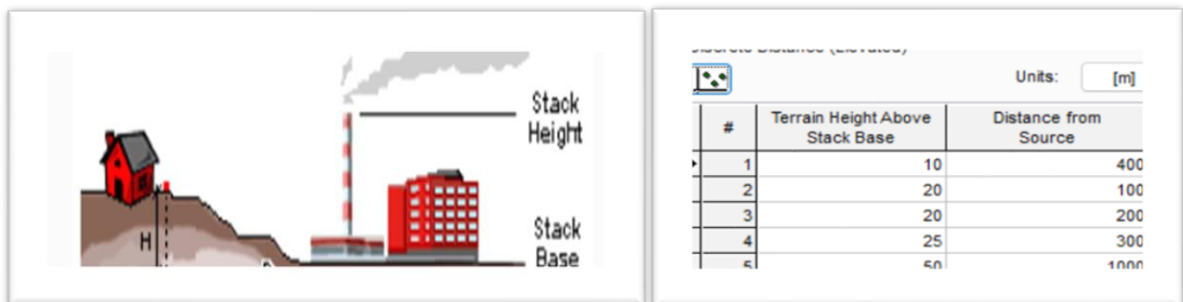
6. Selección de grilla de cálculo para distancias automáticas mediante rango.



The diagram shows a stack on a sloped terrain. A horizontal dashed line indicates the stack height, and the ground level is labeled 'Stack Base'. To the right, a table defines the calculation grid for automatic distances.

#	Terrain Height Above Stack Base	Minimum Distance	Maximum Distance
1	30	50	1000
2	70	1000	3000
3	90	3000	5000
4	100	5000	10000

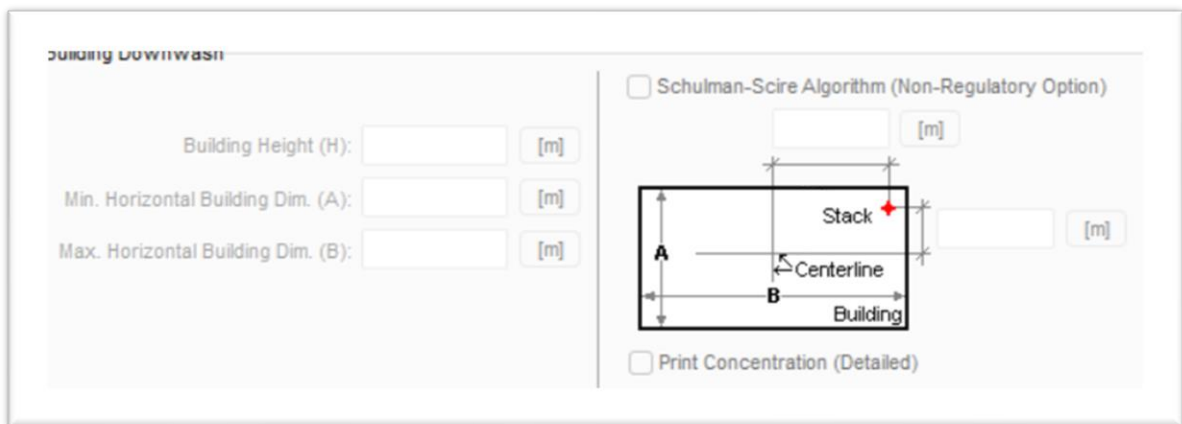
7. Selección de uso discreto de distancias específicas a seleccionar para terreno tanto plano como elevado (opción adecuada para receptores críticos):



The diagram shows a house on a slope with a vertical line labeled 'H' indicating its height. A stack is shown to the right. To the right, a table defines specific discrete distances for critical receptors.

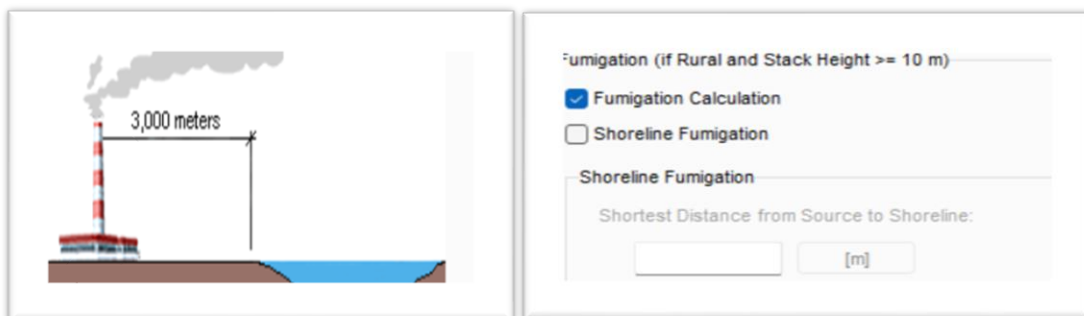
#	Terrain Height Above Stack Base	Distance from Source
1	10	400
2	20	100
3	20	200
4	25	300
5	50	1000

8. Opción para considerar el efecto de los edificios cercanos:



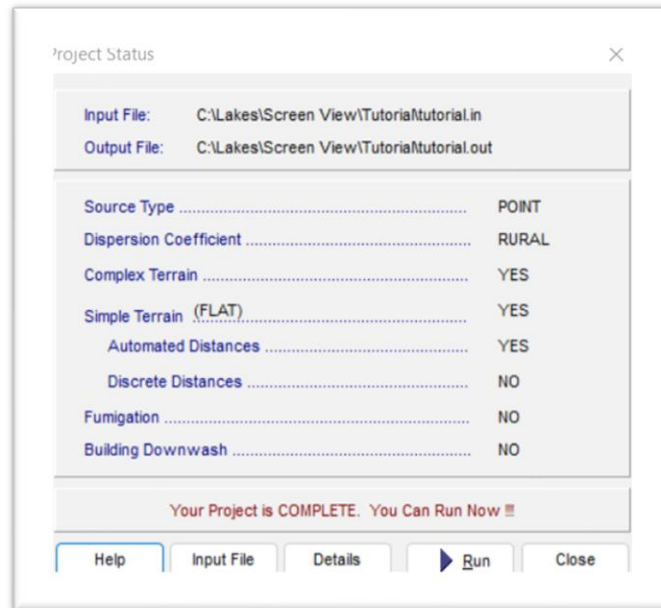
The screenshot shows the 'Building Downwash' settings. It includes input fields for Building Height (H), Min. Horizontal Building Dim. (A), and Max. Horizontal Building Dim. (B), all in meters. There is a checkbox for 'Schulman-Scire Algorithm (Non-Regulatory Option)' and another for 'Print Concentration (Detailed)'. A diagram illustrates a building with a stack, showing dimensions A and B, and the stack height relative to the building centerline.

9. Opción para considerar el efecto tipo fumigación que genera un cuerpo de agua cercano a la fuente de emisión sobre la pluma del contaminante

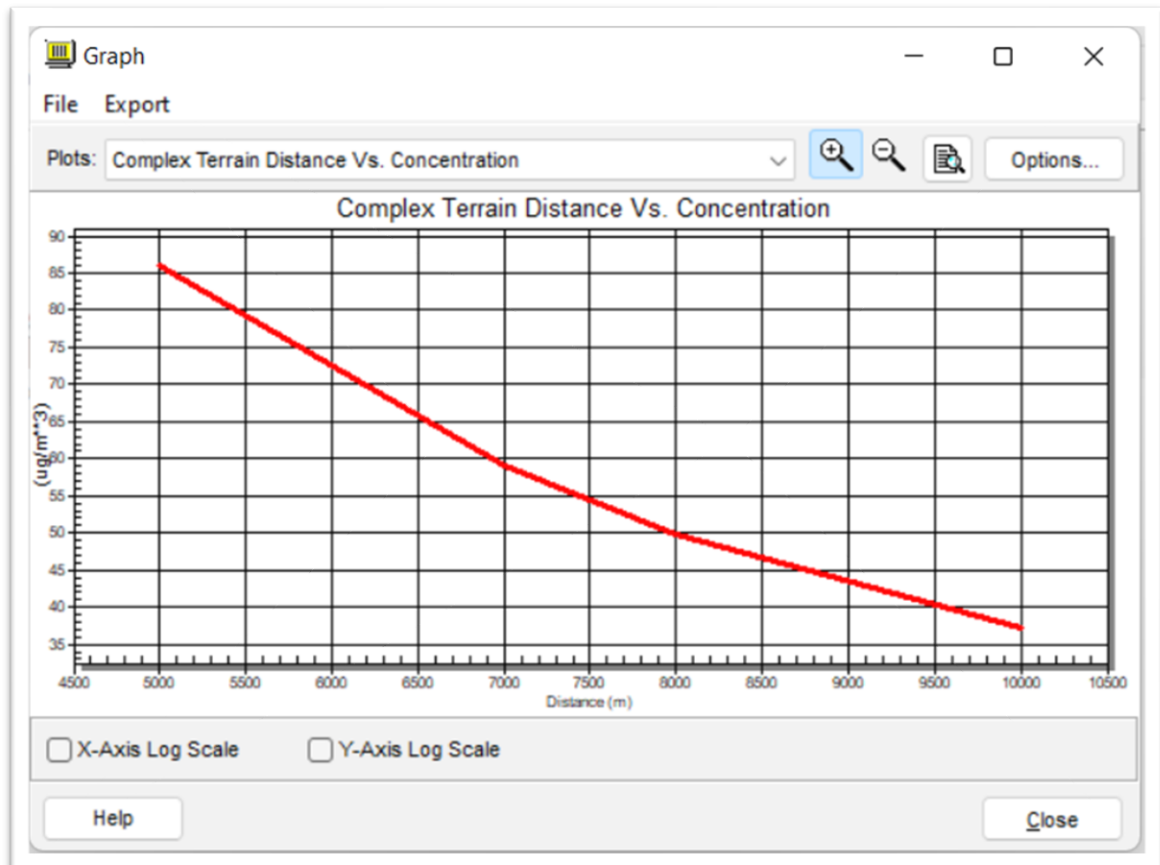


The diagram shows a stack emitting a plume towards a body of water, with a distance of 3,000 meters indicated. To the right, the 'Fumigation' settings interface is shown, including a checkbox for 'Fumigation Calculation' (checked), a checkbox for 'Shoreline Fumigation', and an input field for 'Shortest Distance from Source to Shoreline' in meters.

10. Al finalizar la carga de los datos correspondientes a la fuente de estudio se presenta un resumen del proyecto para la revisión final previa a la “corrida” del modelo:



11. Visualización de los resultados, a) opción grafica donde se observa en un gráfico tipo cartesiano la concentración del compuesto en microgramos sobre metro cubico versus la distancia a la fuente de emisión y b) en un archivo tipo .txt para la visualización de la grilla de cálculo e identificación del punto determinado correspondiente a la máxima concentración hallada:



```

*** SCREEN AUTOMATED DISTANCES ***
*****
*** TERRAIN HEIGHT OF 0. M ABOVE STACK BASE USED FOR FOLLOWING DISTANCES ***

```

DIST (M)	CONC (UG/M**3)	STAB	U10M (M/S)	USTK (M/S)	MIX HT (M)	PLUME HT (M)	SIGMA Y (M)	SIGMA Z (M)	DWASH
100.	0.000	1	1.0	1.2	722.4	721.43	50.58	45.07	NO
200.	0.1518E-04	5	1.0	2.2	10000.0	216.16	35.17	33.77	NO
300.	0.6031E-03	1	3.0	3.5	960.0	307.14	77.67	55.98	NO
400.	0.6848	1	3.0	3.5	960.0	307.14	99.45	79.75	NO
500.	16.20	1	3.0	3.5	960.0	307.14	120.51	112.68	NO
600.	64.48	1	3.0	3.5	960.0	307.14	141.00	161.00	NO
700.	96.05	1	3.0	3.5	960.0	307.14	161.03	219.64	NO
800.	138.2	1	1.5	1.8	515.3	514.29	206.01	305.21	NO
900.	170.1	1	1.5	1.8	515.3	514.29	224.01	381.93	NO
1000.	177.0	1	1.5	1.8	515.3	514.29	239.94	469.03	NO
1100.	170.7	1	1.5	1.8	515.3	514.29	256.00	567.77	NO
1200.	161.4	1	1.5	1.8	515.3	514.29	272.15	678.00	NO
1300.	152.4	1	1.5	1.8	515.3	514.29	288.35	799.64	NO
1400.	144.2	1	1.5	1.8	515.3	514.29	304.57	932.68	NO
1500.	136.9	1	1.5	1.8	515.3	514.29	320.79	1077.12	NO
1600.	130.4	1	1.5	1.8	515.3	514.29	336.99	1233.00	NO
1700.	124.6	1	1.0	1.2	722.4	721.43	377.15	1406.59	NO
1800.	119.8	1	1.0	1.2	722.4	721.43	392.31	1584.77	NO
1900.	115.3	1	1.0	1.2	722.4	721.43	407.50	1774.63	NO
2000.	111.2	1	1.0	1.2	722.4	721.43	422.71	1976.21	NO
2100.	107.3	1	1.0	1.2	722.4	721.43	437.94	2189.55	NO
2200.	103.7	1	1.0	1.2	722.4	721.43	453.17	2414.69	NO
2300.	100.3	1	1.0	1.2	722.4	721.43	468.40	2651.68	NO
2400.	97.19	1	1.0	1.2	722.4	721.43	483.62	2900.57	NO
2500.	94.23	1	1.0	1.2	722.4	721.43	498.82	3161.39	NO
2600.	91.44	1	1.0	1.2	722.4	721.43	514.00	3434.20	NO
2700.	88.82	1	1.0	1.2	722.4	721.43	529.17	3719.05	NO
2800.	89.02	2	1.5	1.8	515.3	514.29	402.80	358.33	NO
2900.	89.57	2	1.5	1.8	515.3	514.29	414.41	370.89	NO
3000.	89.73	2	1.5	1.8	515.3	514.29	425.99	383.54	NO
3500.	86.49	2	1.5	1.8	515.3	514.29	483.54	447.95	NO
4000.	80.09	2	1.5	1.8	515.3	514.29	540.43	514.01	NO
4500.	73.35	2	1.5	1.8	515.3	514.29	596.68	581.37	NO
5000.	68.41	2	1.0	1.2	722.4	721.43	665.59	663.15	NO
5500.	64.49	2	1.0	1.2	722.4	721.43	719.59	731.25	NO
6000.	65.34	3	1.5	1.9	487.6	486.63	531.59	333.64	NO
6500.	65.17	3	1.5	1.9	487.6	486.63	569.39	356.30	NO
7000.	64.13	3	1.5	1.9	487.6	486.63	606.95	378.95	NO
7500.	62.51	3	1.5	1.9	487.6	486.63	644.27	401.60	NO
8000.	60.55	3	1.5	1.9	487.6	486.63	681.36	424.22	NO
8500.	58.41	3	1.5	1.9	487.6	486.63	718.22	446.81	NO
9000.	56.21	3	1.5	1.9	487.6	486.63	754.87	469.36	NO
9500.	54.03	3	1.5	1.9	487.6	486.63	791.30	491.87	NO
10000.	51.92	3	1.5	1.9	487.6	486.63	827.54	514.33	NO

MAXIMUM 1-HR CONCENTRATION AT OR BEYOND 100. M:

Modelación mediante modalidad detallada

Entre las distintas ofertas de este tipo de modelos, cabe destacar el modelo AERMOD utilizado como preferencial por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y utilizado por muchas agencias ambientales. Puede simular simultáneamente muchas fuentes con diferentes formas, en el suelo o elevadas, flotantes o no flotantes, que emiten uno o más contaminantes. Es capaz de dar cuenta de la estructura vertical no homogénea de la capa límite (también mediante el uso de un perfil vertical de variables meteorológicas).

El AERMOD se compone de diferentes módulos:

- El módulo de dispersión atmosférica (a su vez llamado AERMOD).
- El procesador de terreno AERMAP, que se utiliza en presencia de terreno complejo para evaluar la escala de altura de cada receptor.
- El procesador meteorológico AERMET, que se utiliza para preparar la entrada para las simulaciones con el módulo de dispersión.
- El módulo AERSURFACE se puede utilizar para determinar los parámetros geofísicos (longitud de rugosidad, albedo, relación de Bowen) que se ingresarán en AERMET.

El modelo AERMOD se encuentra incluido en LA *Guía sobre modelos de calidad del aire* (publicada como Apéndice W del 40 Código Federal de Regulaciones CFR Parte 51) y es utilizada

tanto por la EPA, como otras agencias de calidad del aire federales, estatales, territoriales y locales, y la industria tanto en los EEUU como el resto del mundo para preparar y revisar nuevos permisos de fuentes, modificaciones de licencias de fuentes, presentaciones y revisiones de programas de mejoras de emisiones, conformidad y otras evaluaciones de la calidad del aire requeridas por la agencias regulatorias. (CFR US., 2022)

A continuación, podemos ver un ejemplo de un gráfico obtenido sobre un mapa obtenido de Google Earth utilizando el modelo AERMOD con datos supuestos de una zona determinada.



Figura 4.8 Salida grafica mediante líneas de isoconcentracion

Bibliografía

- Ayllon, T. (2003). *Elementos de meteorología y climatología segunda edición*. Trillas México: Editorial Trilla SA ISBN 968-24-6725-X.
- CFR US. (2022). *REQUISITOS PARA LA ELABORACIÓN, ADOPCIÓN Y PRESENTACIÓN DE PLANES DE IMPLEMENTACIÓN*. Obtenido de <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-1/subchapter-C/part-51>
- García M, R. H. (2014). Comportamiento de los vientos dominantes y su influencia en la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, ISSN 2334-2501.
- Lakes ambiental. (s.f.). *SCREEN VIEW*. Obtenido de <https://www.weblakes.com/software/freeware/screen-view/>
- Mejía, L. H. (2015). *Caracterización de la capa límite atmosférica en el valle de Alburá a partir de sensores remotos y radiosondeos*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia:

<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Investigacion-SIATA/Tesis-Caraterizacion-Capa-Limite.pdf>

NOAA. (25 de julio de 2022). *The Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA)*. Obtenido de National Centers for Environmental information. National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>

Paquill. (1962). *Atmospheric diffusion*. Londres: Van Nostrand.

Pasquill F, S. F. (1983). *Atmospheric diffusion*. Nueva York: Wiley.

Porta, S. C. (2016). *Calidad del aire Monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos. Efectos en la salud pública*. La Plata: Edulp.

Resolución 559/19. (25 de julio de 2022). *Normas Gobierno de la Provincia de Buenos Aires*. Obtenido de <https://normas.gba.gob.ar/documentos/0X8EDOUd.pdf>

USEPA. (23 de julio de 2022). *Air Modeling - Observational Meteorological Data*. Obtenido de Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM): <https://www.epa.gov/scram/air-modeling-observational-meteorological-data>

USEPA. (23 de julio de 2022). *Air Quality Dispersion Modeling*. Obtenido de Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM): <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>

Zhang, Y. Z. (2014). Diurnal variations of the planetary boundary layer height estimated from intensive radiosonde observations over Yichang, China. *Science China Technological Sciences*, 57(11):2172–.