



# TALLER DE CALIDAD DEL AIRE

Sergio Ramos Herrera  
Jesús Manuel Carrera Velueta  
Elizabeth Magaña Villegas  
Contacto: sergiorhe@hotmail.com

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
Agosto 2016

## 1 CONTAMINACIÓN DEL AIRE

*Contaminación del aire.* Cuando se habla de la contaminación del aire generalmente se refiere a los contaminantes generados por las actividades humanas.

*Contaminante.* Se puede considerar como contaminante a la sustancia que produce un efecto perjudicial en el ambiente; efectos que pueden alterar tanto la salud como el medio ambiente.

*Fuentes de contaminación.* Las fuentes de contaminación del aire se clasifican en cuatro grupos:

- *Puntuales o estacionaria* o fijas. Fuente en un punto fijo.
- *Móviles.* Incluyen a las diversas formas de transporte.
- *De área.* Se refiere a una serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que no pueden ser incluidas en un inventario de fuentes puntuales, pero que en conjunto pueden afectar la calidad del aire de una región.
- *Naturales.*

*Contaminantes criterio y normas de calidad del aire.*

Los contaminantes criterio son aquellos para los cuales se han establecido normas nacionales de calidad del aire. Se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud de los seres humanos. En México, los contaminantes atmosféricos que se miden y norman son:

- Ozono(O<sub>3</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Plomo (Pb)
- Partículas Suspendidas Totales (PST)
- Partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM<sub>10</sub>) y recientemente
- Partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro (PM<sub>2.5</sub>).



Cada contaminante criterio cuenta con una *norma de calidad del aire* que establece la concentración máxima permisible en el aire (tabla 1). Estas normas no deben sobrepasarse más de una vez por año (o más de tres veces al año como sucede para el caso del ozono), para que pueda garantizarse que se protege adecuadamente la salud de la población, inclusive la de los grupos más susceptibles como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias crónicas, entre otros. Las normas vigentes de calidad del aire fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994.

Tabla 1. Normas de calidad del aire

Contaminante	Exposición aguda		Exposición crónica <sup>3</sup> MAA	Norma
	<sup>1</sup> CTPE	<sup>2</sup> FMA		
O <sub>3</sub>	0.11 ppm (1 h) (226 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez cada tres años		NOM-020-SSA1-1993
CO	11 ppm (8 h) (12595 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año		NOM-021-SSA1-1993
PST	210 µg/m <sup>3</sup> (24 h 00)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup>	NOM-025-SSA1-1993 MODIFICADA
PM <sub>10</sub>	75 µg/m <sup>3</sup> (24 h 00)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup>	NOM-025-SSA1-1993 MODIFICADA
PM <sub>2.5</sub>	65 µg/m <sup>3</sup> (24 h 00)	1 vez al año	15 µg/m <sup>3</sup>	NOM-025-SSA1-1993 MODIFICADA
SO <sub>2</sub>	0.13 ppm (24 h 00) (341 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	0.03 ppm	NOM-022-SSA1-1993
NO <sub>2</sub>	0.21 ppm (01 h 00) (395 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año		NOM-023-SSA1-1993
Pb			1.5 µg/m <sup>3</sup> *	NOM-026-SSA1-1993

<sup>1</sup> CTPE: Concentración y Tiempo Promedio de Exposición.

<sup>2</sup> FMA: Frecuencia Máxima Aceptable.

<sup>3</sup> MAA: Media Aritmética Anual y \* Promedio Aritmético en tres meses.

La media aritmética anual es para la protección de la salud de la población susceptible.

### Índice de calidad del aire

En el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), en 1977 la Dirección General de Saneamiento de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, desarrolló el IMECA misma que es guía para el monitoreo en todo el país (DF, 2006). El IMECA, índice Metropolitano de Calidad del Aire, es un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos a la salud, dentro de una región determinada. La tabla 2 muestra cómo interpretar este índice para calificar la calidad del aire y su relación con los efectos a la salud.



Tabla 2. Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) y sus efectos en la salud.

Índice	Calidad del aire	Efectos en la salud de la población
0-50	BUENA	Situación muy favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas
51-100	REGULAR	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas “Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades”
101-200	MALA	Evite las actividades al aire libre, esté atento a la información de calidad del aire. Las personas sensibles pueden sentir molestias en ojos, nariz y garganta. Es <i>Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma</i> “Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos”
201-300	MUY MALA	Evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, esté atento a la información de la calidad del aire. Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares. Es <i>Causante de mayores efectos adversos a la salud en la población en general.</i> “Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos”
301-500	EXTREMADAMENTE MALA	Proteja su salud, evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, esté atento a la información de la calidad del aire. Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana. <i>Causante de efectos adversos a la salud de la población en general, se pueden presentar complicaciones graves en niños y adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma</i>  “Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos”; “No use el automóvil”

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006

El IMECA se puede definir como una función o algoritmo que transforma la concentración de un contaminante a un valor simple adimensional; consta de dos algoritmos de cálculo fundamentales. El primero, para la obtención de subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire, y el segundo, para la combinación de estos en un índice global.

El primer algoritmo involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos de quiebre principales. Estos puntos fueron obtenidos a partir de los criterios mexicanos de calidad del aire y de los niveles para los que ocurren daños significativos a la salud. Al primero se le asigna el valor de 100 y al segundo el valor de 500; entre estos dos puntos se definieron tres valores más: 200, 300 y 400; cuyo objetivo es el de clasificar el intervalo en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire.



Las tablas 3, 4 y 5 contienen las ecuaciones simplificadas para el cálculo del IMECA a partir de los valores de concentración de los contaminantes criterio: O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (Gaceta Oficial del DF, 2006), Pm<sub>10</sub> y Pm<sub>2.5</sub>.

Tabla 3. Algoritmo simplificado para el cálculo del IMECA, para O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>

Contaminante	Intervalo IMECA	Concentración (ppm)	Ecuación simplificada
O <sub>3</sub>	0 – 50	0.000 – 0.055	IMECA(O <sub>3</sub> ) = C[O <sub>3</sub> ] * 100/0.11
	51 – 100	0.056 – 0.11	
	101 – 150	0.111 – 0.165	
	151 – 200	0.166 – 0.220	
	>200	>0.220	
NO <sub>2</sub>	0 – 50	0.000 – 0.105	IMECA(NO <sub>2</sub> ) = C[NO <sub>2</sub> ] * 100/0.21
	51 – 100	0.106 – 0.210	
	101 – 150	0.211 – 0.315	
	151 – 200	0.316 – 0.420	
	>200	>0.420	

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006

Tabla 4. Algoritmo simplificado para el cálculo del IMECA, para SO<sub>2</sub> y CO

Contaminante	Intervalo IMECA	Concentración (ppm)	Ecuación simplificada
SO <sub>2</sub>	0 – 50	0.000 - 0.065	IMECA(SO <sub>2</sub> ) = C[SO <sub>2</sub> ] * 100/0.13
	51 – 100	0.066 - 0.130	
	101 – 150	0.131 - 0.195	
	151 – 200	0.196 - 0.260	
	>200	>0.260	
CO	0 – 50	0.00 – 5.50	IMECA(CO) = C[CO] * 100/11
	51 – 100	5.51 - 11.00	
	101 – 150	11.01 - 16.50	
	151 – 200	16.51 – 22.00	
	>200	>22.00	

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006



Tabla 5. Algoritmo simplificado para el cálculo del IMECA, para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Contaminante	Intervalo IMECA	Concentración (µg/m <sup>3</sup> )	Ecuación simplificada
PM <sub>10</sub>	0 – 50	0 – 60	
	51 – 100	61 – 120	IMECA(PM10) = C[PM10] * 5/6
	101 – 150	121 – 220	
	151 – 200	221 – 320	IMECA(PM10) = 40 + C[PM10] * 0.5
	>200	>320	IMECA(PM10) = C[PM10] * 5/8
PM <sub>2.5</sub>	0 – 50	0 – 15.4	IMECA(PM2.5) = C[PM2.5] * 50/15.4
	51 – 100	15.5 – 40.4	
	101 – 150	40.5 – 65.4	IMECA(PM2.5) = 20.50 + C [PM2.5] * 49/24.9
	151 – 200	65.5 – 150.4	
	>200	> 150.4	IMECA(PM2.5) = 113.20 + C[PM2.5] * 49/84.9
			IMECA(PM2.5) = C[PM2.5] * 201/150.5

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006

Ejemplo 1. En el “Primer Informe de la Calidad del Aire del Estado de Tabasco 2001 – 2002” que publicó el Gobierno del estado en conjunto con la SEDESPA se indica que para el día 17 de mayo de 2002 se alcanzaron las siguientes concentraciones medias de veinticuatro horas de PM<sub>10</sub> en tres ciudades del estado: 71.52 µg/m<sup>3</sup> en la ciudad de Cárdenas, 52.58 µg/m<sup>3</sup> en la ciudad de Comalcalco y de 46.27 µg/m<sup>3</sup> en la ciudad de Villahermosa, medidos según la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana (NOM-035-ECOL-1993). Empleando como referencia el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), evalúe la calidad del aire en estas tres ciudades para ese día.



## 2 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL AMBIENTE

*Transporte advectivo.* Consiste en el movimiento de los contaminantes en el aire por arrastre del viento. La distancia recorrida por el material a una velocidad uniforme del viento  $U$  se estima con la fórmula del movimiento rectilíneo uniforme (MRU):

$$X_{recorrida} = V * t_{viaje} \quad (1)$$

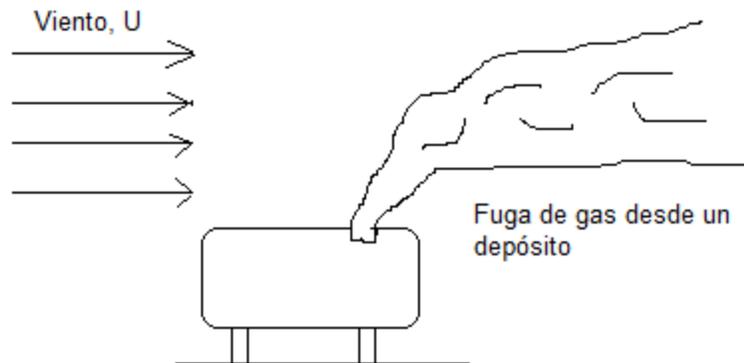


Figura 1. Fuga de gas desde un depósito y transporte advectivo subsecuente.

Ejemplo 2. Estime el tiempo que transcurrirá antes que una nube de material tóxico alcance una población que se encuentra en la dirección en la que sopla el viento a una distancia de 1.0km. La velocidad del viento se ha mantenido estable en 3 m/s.

$$t = \text{—————}$$

*Transporte turbulento del material.* Este mecanismo de transporte tiene como efecto diseminar el material de una región de alta concentración a una región de baja concentración. Se debe a las perturbaciones de la velocidad.

*Difusión molecular.* Este tipo de transporte tiene lugar en fluidos estancados. Mueve material de una región de alta concentración a una región de baja concentración. La ley básica para estimar el flujo de masa es la ley de Fick. Dónde  $D$  es el coeficiente de difusión molecular,  $\rho$  es la densidad del fluido dónde ocurre la difusión y  $w$  es la concentración (en fracción del contaminante).

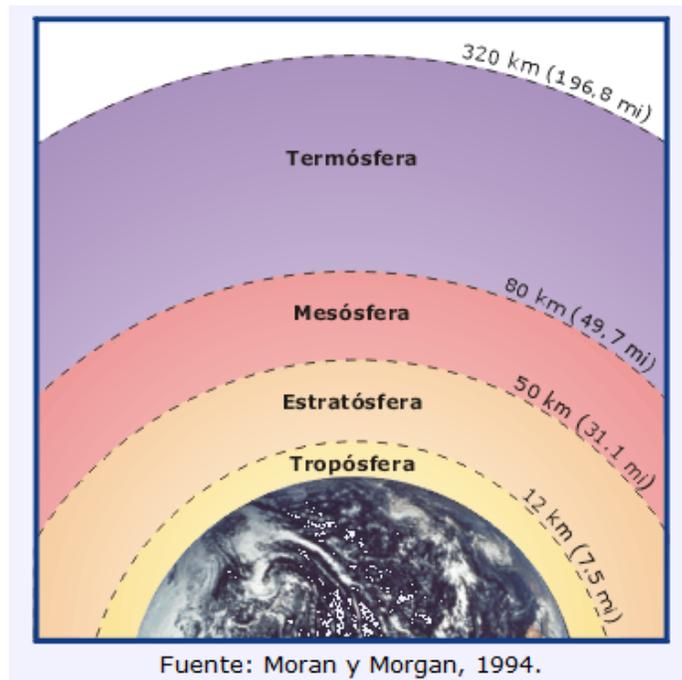
$$j_x = -D\rho \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$



### 3 METEOROLOGÍA DE LA CALIDAD DEL AIRE

Los fenómenos meteorológicos determinan si los contaminantes emitidos por una fuente puntual se elevan en la *atmósfera* y se dispersan o se depositan cerca de la fuente (Mannahan, 2011). La atmósfera está dividida en cuatro capas: la troposfera, la estratosfera, la mesosfera y la termosfera.

La troposfera, la capa más baja, está compuesta por casi tres cuartos de la masa atmosférica y contiene casi todos los componentes hídricos de la atmósfera (vapor, nubes y precipitación). La troposfera -donde se encuentran las masas de aire, los frentes y las tormentas- es la capa más agitada y la que determina el clima de la Tierra. La profundidad de la troposfera varía con la latitud y la estación. La parte superior de la troposfera (tropopausa) está aproximadamente a 16,5 km (54.000 pies) sobre el ecuador y a 8,5 km (28.000 pies) sobre los polos. Los cambios estacionales determinan el grosor de la troposfera y hacen que sea más gruesa en verano (cuando el aire es más cálido) que en invierno. La profundidad de la troposfera cambia constantemente debido a variaciones de la temperatura atmosférica.



Fuente: Moran y Morgan, 1994.

Figura 2. Capas de la atmósfera.

El transporte de la contaminación del aire está determinado por la velocidad y la dirección del viento. La tasa de dispersión depende de la estructura térmica de la atmósfera, así como de la agitación mecánica del aire a medida que se desplaza sobre los diferentes accidentes geográficos. La radiación solar y la humedad, así como otros componentes de la atmósfera, causan un impacto en la transformación de las sustancias contaminantes emitidas en el aire. La remoción de los contaminantes no sólo depende de sus características sino también de fenómenos climáticos como la lluvia, la nieve y la niebla. Estos fenómenos meteorológicos interactivos se estudian como parte de la meteorología de la contaminación del aire (CEPIS).



**Parámetros meteorológicos.** Como la atmósfera es el medio en el que se liberan los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas depende en gran medida de parámetros meteorológicos. Para realizar actividades relativas a la planificación de la calidad del aire es imprescindible comprender la meteorología de la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes. Los planificadores emplean este conocimiento para ayudar a localizar las estaciones de monitoreo de contaminación del aire y para desarrollar planes de implementación orientados al cumplimiento de los estándares de calidad del aire en exteriores.

La meteorología se usa para:

- Predecir el impacto ambiental de una nueva fuente de contaminación del aire y
- Determinar el efecto de las modificaciones de las fuentes existentes en la calidad del aire.

### **Estabilidad de la atmósfera**

El movimiento vertical del aire puede ser inhibido o favorecido a un grado que es determinado por la diferencia de temperatura entre un paquete de aire y los paquetes que lo rodean. Este estatus del aire atmosférico suele referirse cómo *estabilidad atmosférica* y se clasifica en cuatro condiciones básicas:

- *Estable.* En condiciones estables, el movimiento vertical se inhibe.
- *Inestable.* En una atmósfera inestable el movimiento vertical persiste aún cuando desaparezca la fuerza externa que mueve la porción de aire y se produce un mezclado vertical significativo. Este tipo de condición se da durante días soleados y con baja velocidad del viento.
- *Neutra.* En una atmósfera neutral no se favorece ni se inhibe el movimiento vertical del aire. Esta condición puede tener lugar en días ventosos.
- *Inversión térmica.* Cuando las condiciones son extremadamente estables, el aire frío cercano a la superficie es atrampado por una capa de aire cálido sobre este. Esta condición, denominada inversión, prácticamente impide la circulación vertical del aire. Estas condiciones están directamente relacionadas con las concentraciones de contaminantes en el aire ambiental.

Ahora, para estimar la dispersión de los contaminantes en el aire ambiente, estos cuatro niveles de estabilidad se clasifican en siete categorías. La tabla 6 describe estas categorías. La estabilidad típicamente se emplea en modelos de calidad del aire para estimar los parámetros de dispersión vertical y lateral usando modelos de pluma gaussianos.

Tabla 6. Descripción de las categorías de estabilidad atmosférica

Categoría	Descripción
A	Fuerte inestabilidad
B	Moderada inestabilidad
C	Ligera inestabilidad
D	Neutralidad
E	Ligera estabilidad
F	Fuerte estabilidad
G	Inversión

Fuente: Espert V., et.al, 2000



Para la estimación de la estabilidad atmosférica existen varias metodologías. Las categorías de estabilidad y los parámetros de dispersión asociadas que más se prefieren son las curvas sigma de Pasquill-Gifford. La figura 3 da los criterios de Pasquill-Gifford para determinar el tipo de estabilidad atmosférica en función de la velocidad del viento a 10 m de altura, de la insolación y el grado de nubosidad. Como puede verse en el cuadro, las estabilidades A, B y C representan las horas diurnas con condiciones inestables. La estabilidad D, los días o noches con cielo cubierto con condiciones neutrales. Las estabilidades E y F, las condiciones nocturnas estables, y se basan en la cantidad de cobertura de nubes. Por consiguiente, la clasificación A representa condiciones de gran inestabilidad y la clasificación F, de gran estabilidad.

Viento superficial Velocidad (a 10 m) (m/s)	Insolación			Noche	
		Moderada	Ligera	Cobertura de nubes bajas* ≥ 4/8	Cobertura de nubes ≥ 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

\* Ligeramente cubierto  
Nota: Se deben asumir clases neutrales D para condiciones de cielo cubierto durante el día o la noche

Figura 3. Categorías de Pasquill-Gifford.

Otro método para estimar la estabilidad atmosférica es el método *delta T / radiación solar neta*, como su nombre lo indica, basado en el gradiente de temperatura y la radiación solar neta. Este último método utiliza la velocidad del viento (medida a 10 m) en combinación con la radiación solar neta durante el día y una diferencia vertical de temperatura durante la noche (EPA, 2000) (tabla 7 y 8).

Tabla 7. Criterios para categorías de estabilidad atmosférica.  
Método *delta T / radiación solar (día)*.

Velocidad del viento (m/s)	≥ 925	925-675	675-175	<175
<2	A	A	B	D
2-3	A	B	C	D
3-5	B	B	C	D
5-6	C	C	D	D
≥6	C	D	D	D

Fuente: EPA, 2000

Tabla 8. Criterios para categorías de estabilidad atmosférica.  
Método *delta T / radiación solar (noche)*.

Velocidad del viento(m/s)	Gradiente vertical de temperatura	
	<0	≥0
< 2.0	E	F
2.0-2.5	D	E
≥ 2.5	D	D

Fuente: EPA, 2000



Ejemplo 3. Una estación meteorológica reporta que a medio día la radiación solar neta fue de  $862.5 \text{ W/m}^2$  con un viento de  $2.03 \text{ m/s}$ . Estime la condición de estabilidad que domina a esa hora.

Tipo de estabilidad = \_\_\_\_\_

### **Ley potencial para el perfil del viento**

Las características físicas de la superficie terrestre se denominan rasgos del terreno o topografía. Los rasgos topográficos no sólo influyen en el calentamiento de la Tierra y del aire que la rodea sino también en el flujo del aire. Los rasgos del terreno, como se podría esperar, afectan sobre todo el flujo del aire relativamente cercano a la superficie terrestre. Como se indica en la figura estos rasgos se pueden agrupar en cuatro categorías: plano, montaña/valle, tierra/agua y áreas urbanas.

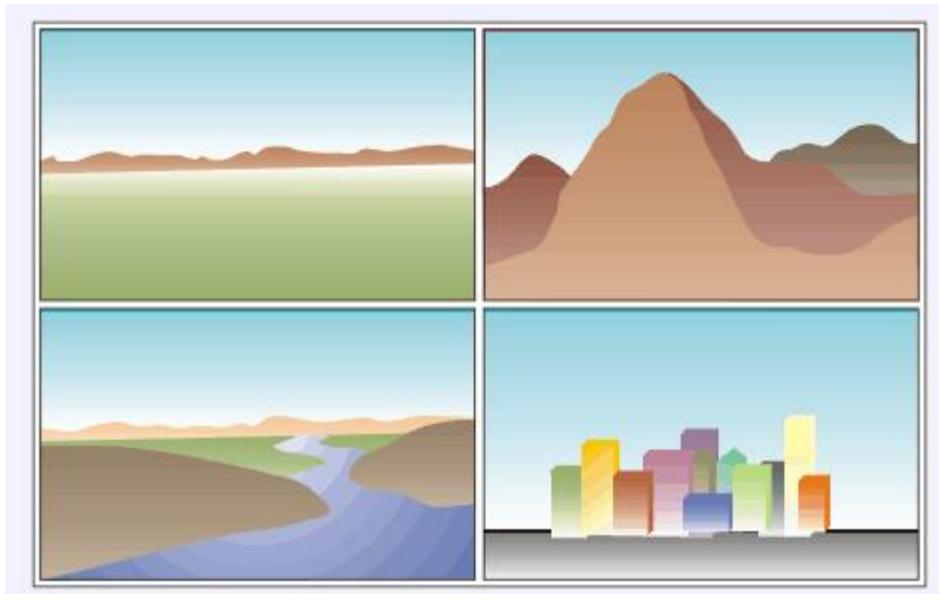


Figura 4. Rasgos el terreno.

Los rasgos topográficos afectan la atmósfera de dos maneras: *térmicamente* (a través del calor) y *geoméricamente* (o *mecánicamente*).

- *Térmicamente*. La turbulencia térmica se produce por el calentamiento diferencial. Los objetos emiten calor en tasas distintas. Por ejemplo, un área con pasto no tendrá capacidad de absorción y, en consecuencia, liberará tanto calor como una playa de estacionamiento asfaltada.
- *Mecánicamente*. La turbulencia mecánica es causada por el viento que fluye sobre objetos de tamaños y formas diferentes. Por ejemplo, el flujo del viento que rodea un edificio será diferente del de un maizal.



La figura 5 indica que la velocidad del viento aumenta con la altitud en cada uno de los tres tipos de terrenos representados. Las áreas urbanas con construcciones densas y edificios altos ejercen una fuerza friccional grande sobre el viento haciendo que disminuya, cambie de dirección y se haga más turbulento. Por consiguiente, los vientos de gradiente (esto es, los que no se ven afectados por la fricción) alcanzan mayores altitudes cuando se producen sobre áreas urbanas que cuando lo hacen sobre el nivel del suelo.

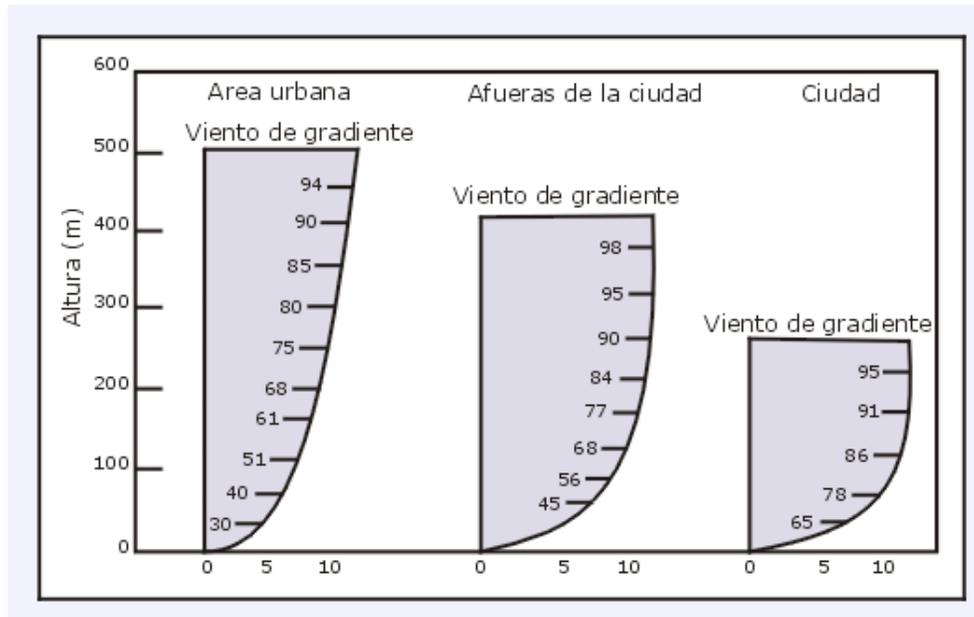


Figura 5. Efecto de los rasgos del terreno sobre el perfil vertical del viento.

Note cómo *la velocidad del viento aumenta con la altura*, de hecho esto es así dentro de la capa límite atmosférica. La velocidad del viento que se incluye en los modelos de dispersión, corresponde a la velocidad a la altura de la emisión. Es común medir la velocidad del viento a una altura de 10 m sobre la superficie del suelo o a cualquier otra altura de referencia. Este valor conocido puede usarse para determinar la velocidad a la altura  $z$  deseada. La ecuación (3) se conoce cómo la ley potencial para el perfil del viento. La EPA sugiere que esta relación puede ser útil en terreno no complejo (terreno plano, sin elevaciones por encima del tiro de la chimenea) y hasta una altura de 200 m por arriba de la superficie del suelo.

$$\frac{U(z)}{U_a} = \left(\frac{z}{z_a}\right)^n \quad (3)$$

Donde el valor del exponente  $n$  depende de las condiciones de estabilidad atmosférica y rugosidad superficial del terreno. La tabla 9 lista valores del exponente  $n$  que pueden usarse exitosamente hasta alturas de 200 m. Esta tabla refleja los efectos en las condiciones superficiales al presentar valores de  $n$  para áreas urbanas y rurales. Los efectos de la estabilidad atmosférica se dan de acuerdo a las categorías de estabilidad de Pasquill-Gifford.



Tabla 9. Estimados de  $n$  en la ecuación para el perfil del viento

Área	Tipo de estabilidad atmosférica					
	A	B	C	D	E	F
Urbana	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30
Rural	0.07	0.07	0.10	0.15	0.35	0.55

Fuente: Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide. Kart B. Schnelle, Jr./Partha R. Dey

Ejemplo 4. La altura de las chimeneas en el complejo termoeléctrico Adolfo López Mateos, en Veracruz, es de 120 m. Estime la velocidad del viento a esta altura si se sabe que a 10 m de altura es de 4.8 m/s, según lo mide una estación cercana.

Tipo de estabilidad (tabla 7) = \_\_\_\_\_

Valor de  $n$  = \_\_\_\_\_

Posibles valores de  $U$  (m/s) = \_\_\_\_\_

### Rosa de vientos

El viento tiene efectos importantes ya que diluye los contaminantes a medida que son emitidos y los transporta lejos de su fuente, moviéndose principalmente en la dirección del viento. De manera que conocer la dirección predominante del viento en una región nos permite modelar el impacto que una emisión tiene en los receptores a ras de suelo. El viento puede considerarse un vector, porque está definido por su dirección, magnitud y velocidad (Rodríguez et al, 2004). El término dirección del viento, denota la dirección desde donde este sopla y se refiere al punto cardinal de donde viene el viento referido al norte verdadero o al norte geográfico. Los puntos del horizonte desde donde viene el viento pueden mencionarse como sureste (SE), noreste (NE), etc. También se pueden indicar mediante la dirección en grados de 0 a 360° a partir del norte verdadero, en el sentido de las manecillas del reloj. La tabla 10 contiene 16 direcciones del viento e indica el rumbo y su dirección en grados correspondientes.

Tabla 10. Interpretación de la dirección del viento.

Rumbo	Grados De	A
N	348.9	11.2
NNE	11.3	33.8
NE	33.9	56.2
ENE	56.3	78.8
E	78.9	101.2
ESE	101.3	123.8
SE	123.9	146.2
SSE	146.3	168.8
S	168.9	191.2
SSW	191.3	213.8
SW	213.9	236.2
WSW	236.3	258.8
W	258.9	281.2
WNW	281.3	303.8
NW	303.9	326.2
NNW	326.3	348.8



La información correspondiente a la dirección y magnitud de la velocidad del viento en un periodo de tiempo dado se resume de manera gráfica mediante una rosa de vientos (Figura 6). Esta gráfica representa de manera simultánea la frecuencia de la dirección y velocidad del viento alcanzada en un cierto periodo de tiempo.

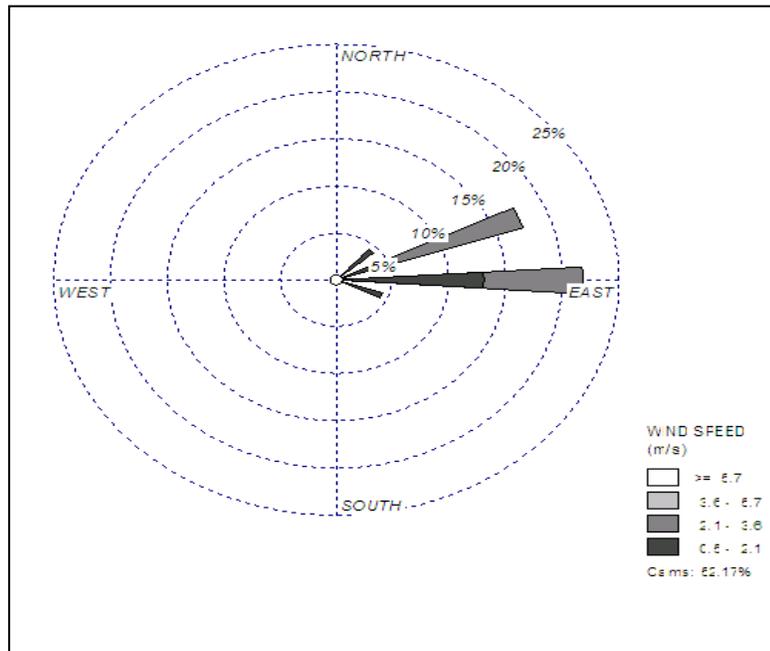


Figura 6. Rosa de vientos del 5 de agosto de 2005; La Isla

Actualmente existen aplicaciones gratuitas para hacer rosas de vientos con los datos meteorológicos horarios medidos por alguna estación meteorológica. Uno de estos paquetes se conoce como WRPLOT View desarrollado por *Lakes Environmental*. El software es de acceso libre y corre en ambiente Windows y fue programado para reconocer algunos formatos de archivos de datos meteorológicos más populares e incluye también una función para importar datos directamente de Excel. El software puede obtenerse gratuitamente en la página Web [www.weblakes.com](http://www.weblakes.com). Sin embargo es indispensable un registro y la licencia (gratuita) que se otorga debe renovarse cada año.

Otra aplicación gratuita es SADM (Software de Análisis de Datos Meteorológicos) disponible en el sitio web de la Red de Información Analítica Ambiental del Estado de Tabasco (RIAET), [www.riaat.ujat.mx](http://www.riaat.ujat.mx). Este software se desarrolló como una aplicación de Matlab por profesores de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Figura 7).

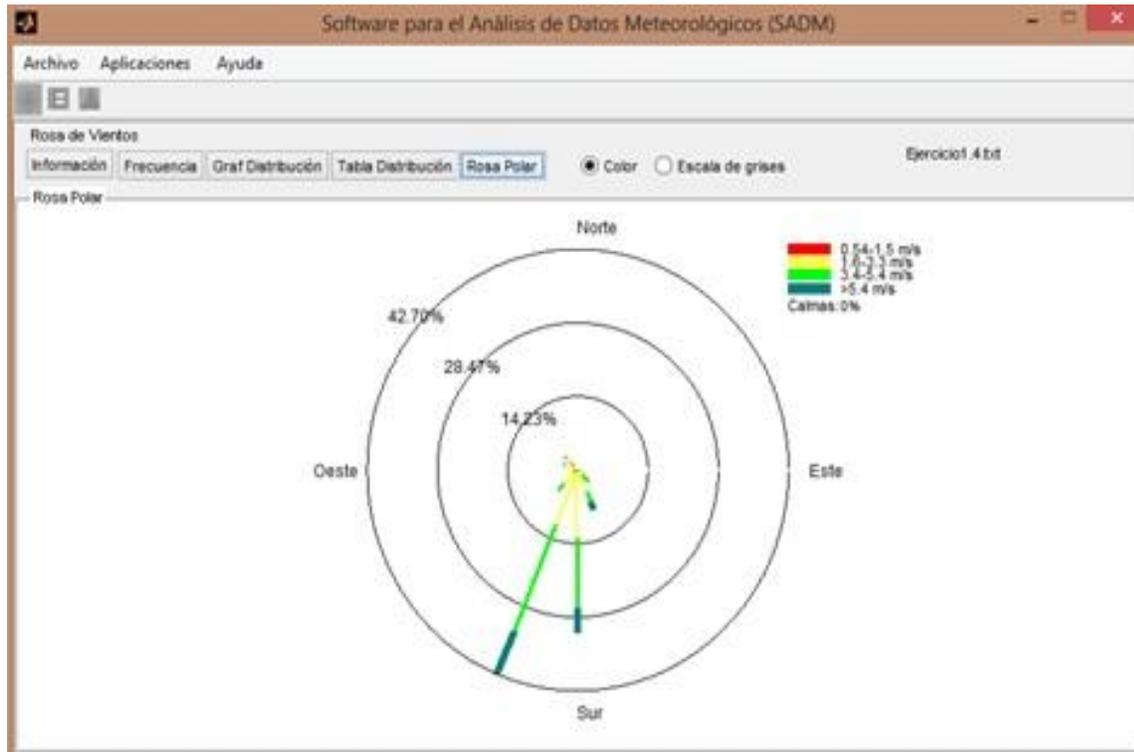


Figura 7. Rosa de vientos de 1 y 2 de Julio de 2011; ITVH

### **Estabilidad y comportamiento de la pluma**

El grado de estabilidad atmosférica y la altura de mezcla resultante tienen un importante efecto en las concentraciones de contaminantes en el aire ambiental. Si bien en la discusión sobre la mezcla vertical no hemos abordado el movimiento horizontal del aire, o el viento, es importante saber que este se produce bajo condiciones de inversión. Los contaminantes que no se pueden dispersar hacia arriba lo pueden hacer horizontalmente a través de los vientos superficiales. La combinación de los movimientos verticales y horizontales del aire influye en el comportamiento de las plumas de fuentes puntuales (chimeneas).

La *pluma de espiral* (figura 8) se produce en condiciones muy inestables debido a la turbulencia causada por el acelerado giro del aire. Mientras las condiciones inestables generalmente son favorables para la dispersión de los contaminantes, algunas veces se pueden producir altas concentraciones momentáneas en el nivel del suelo si los espirales de la pluma se mueven hacia la superficie.

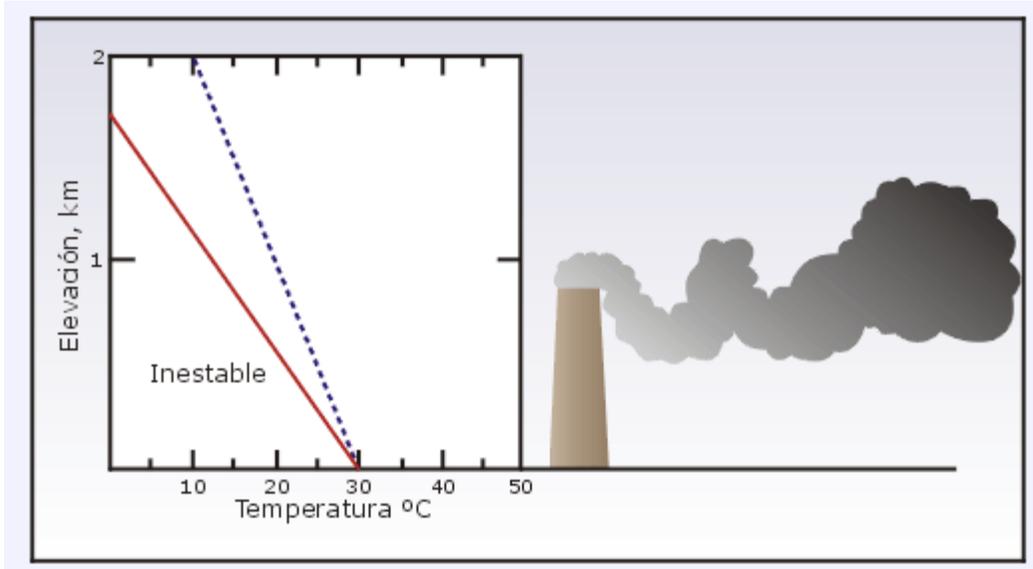


Figura 8. Pluma de espiral.

La *pluma de abanico* (figura 9) se produce en condiciones estables. El gradiente de inversión inhibe el movimiento vertical sin impedir el horizontal y la pluma se puede extender por varios kilómetros a sotavento de la fuente. Las plumas de abanico ocurren con frecuencia en las primeras horas de la mañana durante una inversión por radiación.

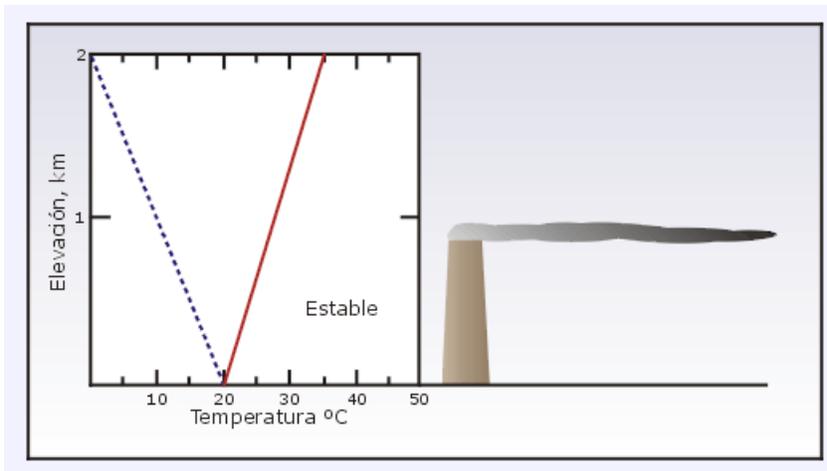


Figura 9. Pluma de abanico.

La *pluma de cono* (figura 10) es característica de las condiciones neutrales o ligeramente estables. Este tipo de plumas tiene mayor probabilidad de producirse en días nublados o soleados, entre la interrupción de una inversión por radiación y el desarrollo de condiciones diurnas inestables.

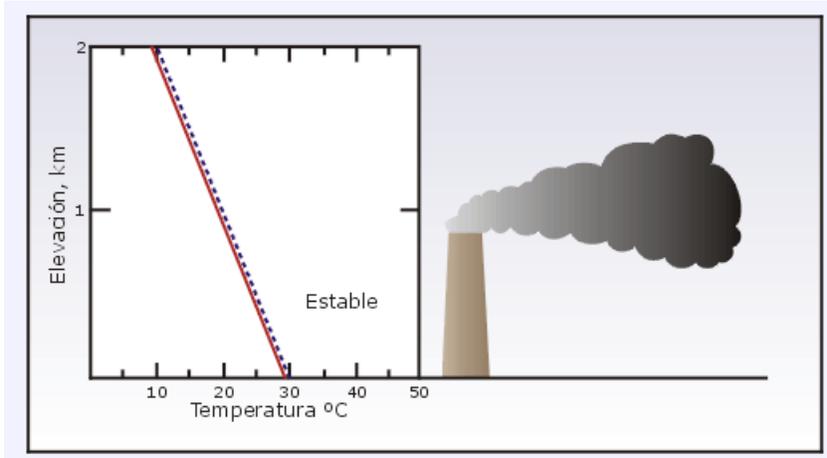


Figura 10. Pluma de cono.

Obviamente, un problema importante para la dispersión de los contaminantes es la presencia de una capa de inversión, que actúa como una barrera para la mezcla vertical. Durante una inversión, la altura de una chimenea en relación con la de una capa de inversión muchas veces puede influir en la concentración de los contaminantes en el nivel del suelo. Cuando las condiciones son inestables sobre una inversión (figura 11) la descarga de una pluma sobre esta da lugar a una dispersión efectiva sin concentraciones notorias en el nivel del suelo alrededor de la fuente. Esta condición se conoce como *flotación*.

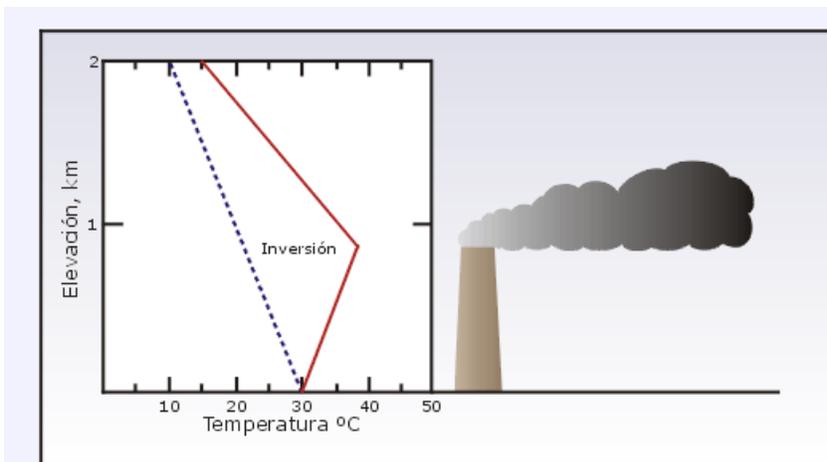


Figura 11. Pluma con flotación positiva.

Si la pluma se libera justo debajo de una capa de inversión, es probable que se desarrolle una grave situación de contaminación del aire. Ya que el suelo se calienta durante la mañana, el aire que se encuentra debajo de la mencionada capa se vuelve inestable. Cuando la inestabilidad alcanza el nivel de la pluma entrampada bajo la capa de inversión, los contaminantes se pueden transportar rápidamente hacia abajo hasta llegar al suelo (figura 12). Este fenómeno se conoce como *fumigación*. Las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo pueden ser muy altas cuando se produce la fumigación. Esta se puede prevenir si las chimeneas son suficientemente altas.

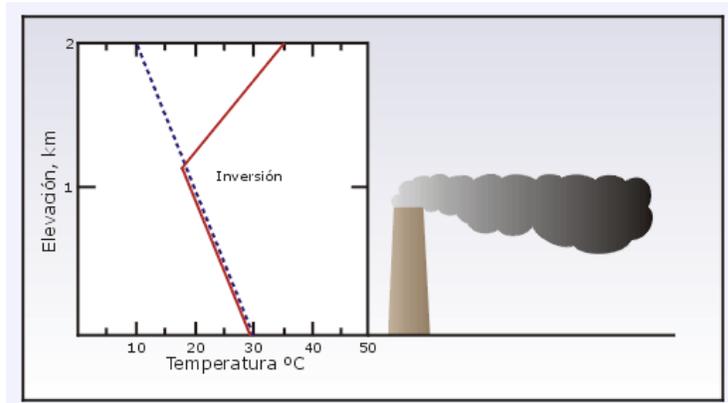


Figura 12. Pluma con flotación negativa.

### Altura de mezcla

La profundidad vertical de la atmósfera donde se produce el mezclado se denomina capa de mezcla (Figura 12). La parte superior de esta capa se conoce como altura de mezcla. Esta determina el alcance vertical del proceso de dispersión de los contaminantes liberados debajo de ella. Se trata de una variable importante para los estudios de calidad del aire ya que limita la dispersión vertical de los contaminantes. Si bien las alturas de mezcla generalmente no se miden directamente, es posible obtener cálculos aproximados a partir de las mediciones meteorológicas rutinarias.

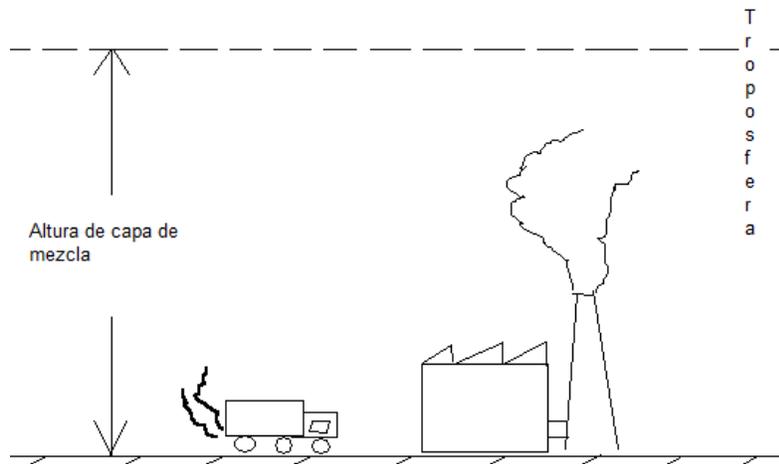


Figura 12. La capa de mezcla.

Por lo general, las alturas de mezclado producidas por la mañana y por la tarde se estiman a partir de los perfiles de temperatura vertical tomados a la salida y puesta del sol y de la temperatura superficial. El perfil vertical de la temperatura se miden con radiosondas, instrumentos transportados elevados a través de globos más ligeros que el aire (esto es, globos generalmente llenos de hidrógeno o helio). Para los modelos de la calidad del aire, las alturas de mezcla por hora se pueden estimar a partir de los valores de altura de mezcla tomados dos veces al día -a la salida y la puesta del sol- y las categorías de estabilidad atmosférica de cada hora.



## 4 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

### *Modelos de calidad del aire*

Los modelos de dispersión de calidad del aire consisten en un grupo de ecuaciones matemáticas que sirven para interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por la dispersión y por el impacto de las plumas. Estos modelos incluyen los estimados de dispersión mencionados anteriormente y las diferentes condiciones meteorológicas, incluidos los factores relacionados con la temperatura, la velocidad del viento, la estabilidad y la topografía.

Existen cuatro tipos genéricos de modelos: gaussiano, numérico, estadístico y físico.

- Los *modelos gaussianos* emplean la ecuación de distribución gaussiana (véase la discusión sobre distribución gaussiana a continuación) y son ampliamente usados para estimar el impacto de contaminantes no reactivos.
- En el caso de fuentes de áreas urbanas que presentan contaminantes reactivos, los *modelos numéricos* son más apropiados que los gaussianos pero requieren una información extremadamente detallada sobre la fuente y los contaminantes, y no se usan mucho.
- Los *modelos estadísticos* se emplean cuando la información científica sobre los procesos químicos y físicos de una fuente están incompletos o son vagos.
- Por último, están los *modelos físicos*, que requieren estudios de modelos del fluido o en túneles aerodinámicos del viento. La adopción de este enfoque implica la elaboración de modelos en escala y la observación del flujo en estos. Este tipo de modelos es muy complejo y requiere asesoría técnica de expertos. Sin embargo, en el caso de áreas con terrenos complejos y condiciones del flujo también complejas, flujos descendentes de la chimenea, y edificios altos, esta puede ser la mejor opción.

La selección de un modelo de calidad del aire depende:

- Del tipo de contaminantes emitidos
- De la complejidad de la fuente y
- Del tipo de topografía que rodea la instalación.

Algunos contaminantes se forman a partir de la combinación de contaminantes precursores. Por ejemplo, el ozono en el nivel del suelo se forma cuando los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) actúan bajo la acción de la luz solar. Los modelos para predecir las concentraciones de ozono en el nivel del suelo emplearían la tasa de emisión de COV y NO<sub>x</sub> como datos de entrada. Además, algunos contaminantes reaccionan fácilmente una vez que son emitidos en la atmósfera. Estas reacciones reducen las concentraciones y puede ser necesario considerarlas en el modelo. La complejidad de la fuente también desempeña un papel en la selección. Algunos contaminantes y pueden ser emitidos desde chimeneas bajas sujetas a flujos descendentes aerodinámicos. Si este es el caso, se debe emplear un modelo que considere el fenómeno.

En la dispersión de las plumas y los contaminantes, la topografía es un factor importante que debe ser considerado al seleccionar un modelo. Las plumas elevadas pueden tener un impacto en áreas de terrenos altos. Las alturas de este tipo de terrenos pueden experimentar mayores concentraciones de contaminantes debido a que se encuentran más cerca de la línea central de la



pluma. En el caso que existan terrenos elevados, se debe usar un modelo que considere este hecho.

### **Modelo gaussiano de la calidad del aire**

De los cuatro tipos de modelos de dispersión mencionados anteriormente, el gaussiano, que incluye la ecuación de distribución gaussiana (Ecuación 4) es el más usado. La ecuación de distribución gaussiana emplea cálculos relativamente simples, que sólo requieren dos parámetros de dispersión,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  para identificar la variación de las concentraciones de contaminantes que se encuentran lejos del centro de la pluma. Esta ecuación determina las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo sobre la base de las variables atmosféricas de tiempo promedio (por ejemplo, la temperatura y la velocidad del viento). Por lo tanto, no es posible obtener un "cuadro" instantáneo de las concentraciones de la pluma. Sin embargo, cuando se emplean promedios de tiempo de diez minutos a una hora para estimar las variables atmosféricas de tiempo promedio necesarias en la ecuación, se puede asumir que las concentraciones de contaminantes en la pluma están distribuidas normalmente, como se señala en la figura 13.

$$C_{x,y,z} = \frac{G}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{z - H_e}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{z + H_e}{2\sigma_z^2}\right] \quad (4)$$

$C$  = concentración del contaminante en el nivel del suelo (g/m<sup>3</sup>)

$Q$  = masa emitida por unidad de tiempo

$\sigma_y$  = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección y (horizontal)

$\sigma_z$  = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección z (vertical)

$u$  = velocidad del viento

$y$  = distancia en dirección horizontal

$z$  = distancia en dirección vertical

$H$  = altura efectiva de la chimenea

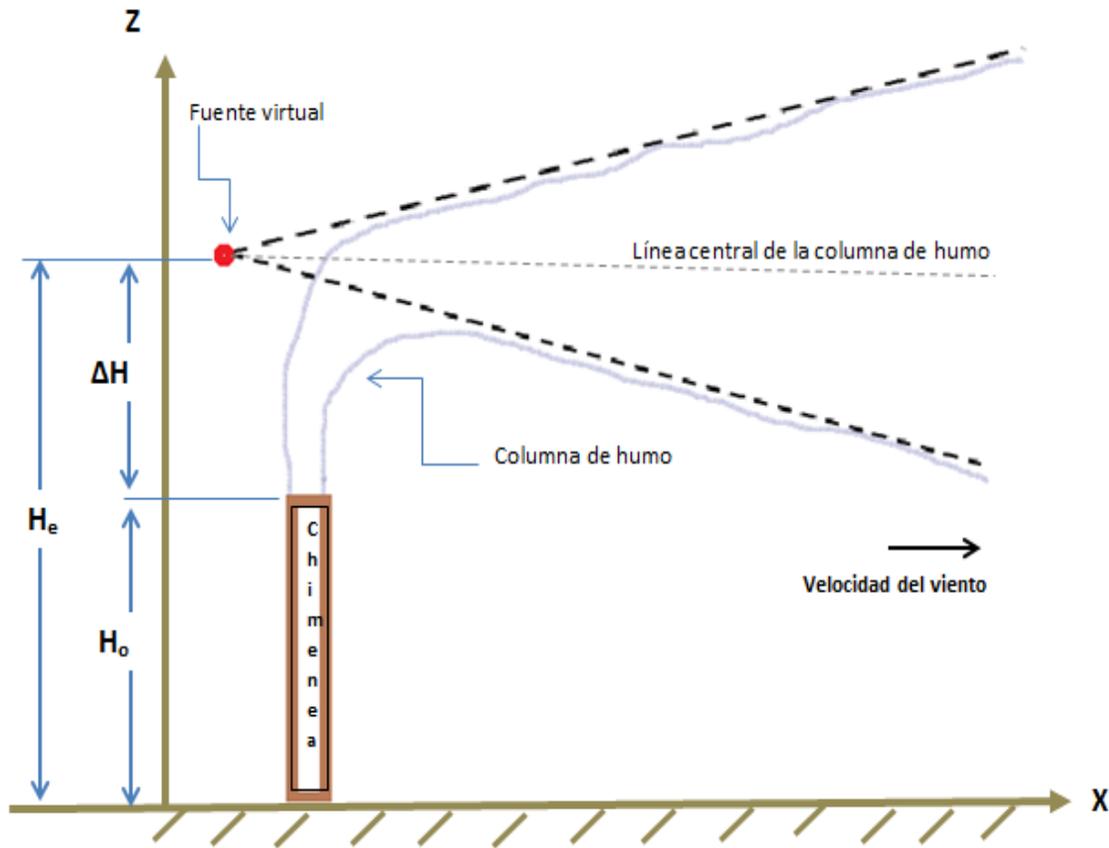


Figura 13. Comportamiento típico de un pluma gaussiano

### **Coefficientes de dispersión**

Los parámetros  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son los coeficientes de dispersión transversal en las direcciones  $y$  y  $z$  respectivamente, con dimensiones de longitud. Ambos coeficientes dependen de la distancia medida a lo largo del eje  $x$  (cuya dirección coincide con la del viento) y se pueden estimar de acuerdo a las siguientes formulas potenciales (Ecuación 5).

$$\sigma_y = ax^p \quad (5a)$$

$$\sigma_z = bx^q \quad (5b)$$

En ambas expresiones  $a$ ,  $b$ ,  $p$  y  $q$  son coeficientes dados por Tadmor y Gur (1969), que dependen de la distancia y del tipo de estabilidad que predomina en la atmósfera en el momento de la evaluación (tabla 11). En las expresiones (2.26) la distancia debe sustituirse en metros y la unidad de los coeficientes será el mismo.



Tabla 11. Constantes a, p, b, q para el cálculo de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  en medio rural

Categorías de estabilidad	$\sigma_y$		$\sigma_z$ (0.5 km a 5km)		$\sigma_z$ (5 km a 50 km)	
	a	p	b	q	b	q
A	0.3658	0.9031	0.00025	2.1250	---	---
B	0.2751	0.9031	0.0019	1.6021	---	---
C	0.2089	0.9031	0.20	0.8543	0.5742	0.7160
D	0.1474	0.9031	0.30	0.6532	0.9605	0.5409
E	0.1046	0.9031	0.40	0.6021	2.1250	0.3979
F	0.0722	0.9031	0.20	0.6020	2.1820	0.3310

Fuente: Espert V., et.al, 2000

### Sobre elevación de la pluma

Para una modelación correcta de la dispersión, es necesario tomar en cuenta la sobre elevación que experimenta el material descargado a la atmósfera. La elevación de la pluma de contaminantes, por encima del punto de descarga, puede deberse a dos causas, las cuales pueden actuar simultáneamente: La fuerza boyante y el momentum de la pluma.

- La boyantes se debe a que los gases de salida tienen una densidad diferente a la del aire que los rodea. Si los gases son más ligeros que el aire, la boyantes es positiva; mientras que si son más pesados que el aire, su boyantes es negativa.
- El ímpetu o momentum de la pluma se debe a la velocidad de salida de los gases. En cualquiera de estos casos, se altera la altura efectiva de la emisión (figura 13), la cual es usada en los cálculos de dispersión del contaminante, y que se obtiene al sumar la altura física de la chimenea con la sobre elevación del material.

### Fórmula de Holland para la altura de la columna de humo

La fórmula de Holland (Ecuación 6) presentada por Turner (1970) es aplicable a condiciones neutrales en la atmósfera (Nevers, 1998). Los parámetros de esta fórmula son como los de la sección anterior.

$$\Delta H = \frac{V_s d}{U} 1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P d \frac{T_s - T_a}{T_s} \quad (6)$$

Para su uso en condiciones diferentes de las neutrales (Schnelle y Dey, 2000), la fórmula debe multiplicarse por un factor de corrección,  $FC$ , el cual es dado por la siguiente expresión:

$$FC = \frac{St}{10} + 0.70 \quad (7)$$

Donde  $St$  y  $FC$  se dan en función de la categoría de estabilidad (tabla 12)

Tabla 12. Factor de corrección en la fórmula de Holland.

Estabilidad	St	FC
A	5.0	1.2
B	4.0	1.10
C	3.5	1.05
D	3.0	1.00
E	2.0	0.90
F	1.0	0.80



Ejemplo 5. Estímese la sobre elevación de los gases de combustión que descarga una chimenea de 5.5 m de diámetro y 120 m de altura. Los gases de salida tienen una velocidad entre 22 y 23 m/s, la velocidad del viento es de 4.8 m/s y la presión es de 1017.5 mb. La temperatura de los gases de combustión está entre 425 y 428 K y la del aire ambiente es de 20.3 C.

Tipo de estabilidad (tabla 7) = \_\_\_\_\_

Factor de corrección (tabla 12) = \_\_\_\_\_

$\Delta H$  (ecuación 6) = \_\_\_\_\_

La ecuación 4 solo proporciona concentraciones para tiempos promedios de 10 minutos. Estimaciones de concentraciones para tiempos superiores a los 10 minutos y hasta promedios de tres horas pueden hacerse por interpolación; mientras que para tiempos todavía mayores es necesario tomar en cuenta la información meteorológica: velocidad y dirección del viento, nubosidad y temperatura; durante el tiempo promedio para el que se desea calcular la concentración media. Una ley que se propone para extrapolar a valores horarios y hasta trihorarios es:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{t_1}{t_2}^n \quad (8)$$

Dónde n está en función de la estabilidad atmosférica. Por ejemplo para atmósfera inestable,  $n=0.50$  y para atmósfera estable,  $n=0.20$ . Con atmósfera neutra,  $n=0.35$  (Espert y López, 2004).

Una aplicación básica de la ecuación 4, es estimar la concentración para receptores a ras del suelo y en dirección del viento ( $y=z=0$ ). En este caso la ecuación 4 se reduce la ecuación 9.

$$C_{x,y,z} = \frac{G}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp -\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2} \quad (9)$$

Dos cálculos básicos útiles son la distancia a la que la pluma impacta en el suelo y la distancia a la que se alcanza la concentración máxima, que deben satisfacer las condiciones indicadas en las ecuaciones 10 y 11. La concentración máxima se da por la ecuación 12.

$$\sigma_z^* x = \frac{H_e}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_z x_{max} = \frac{H_e}{2} \quad (11)$$

$$C_{x_{max}} = \frac{2G\sigma_z(x_{m\acute{a}x})}{e\pi U H^2 \sigma_y(x_{m\acute{a}x})} \quad (12)$$



Ejemplo 6. Calcule la distancia a la que la pluma de contaminantes toca suelo ( $x^*$ ) para la chimenea de la termoeléctrica. También calcule la distancia donde la concentración es máxima a nivel de piso ( $x_{máx}$ ).

Ejemplo 7. Una fundidora de cobre tiene una chimenea de 150 m de alto cuyo diámetro de salida es de 3 m de diámetro. La descarga de gases tiene una velocidad de salida de 20 m/s y la temperatura del gas a la salida y de los alrededores es 100°C y 20 °C respectivamente. La chimenea descarga 1000 g/s de SO<sub>2</sub>. Estime a) La sobre elevación de la pluma y b) La concentración a una distancia de 1000 m viento abajo. Considere que la velocidad del viento en un día típico es de 3.5 m/s y la clase de estabilidad que predomina es la tipo B.

**Modelo de dispersión gaussiana: fuente instantánea**

Una fuga, a una altura h del suelo, de una cantidad M de material desde un depósito de un gas puede modelarse como una *emisión instantánea*, si el tiempo de duración de la fuga es menor al tiempo considerado para estimar un impacto potencial a los receptores. La figura 14 muestra el esquema más simple de cómo se comporta una emisión instantánea o puff.

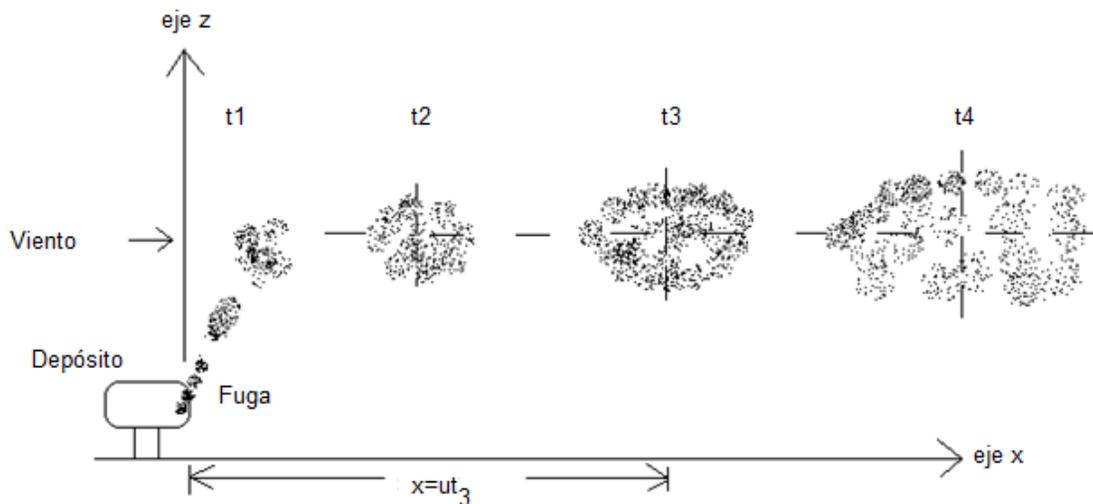


Figura 14. Esquema de una emisión instantánea

La distribución de la concentración en las tres direcciones x, y, z, que identifican la posición de un receptor, se estima con la ecuación 13.

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{2\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{z+h}{2\sigma_z^2}\right] \quad (13)$$



En esta expresión, la concentración se modela como una distribución normal trivariada, es decir, la distribución de la concentración a lo largo de cualquiera de los tres ejes locales de la pluma, sigue una distribución normal. De acuerdo a esto, la concentración máxima, al tiempo  $t$ , se alcanza en el centro de la nube; y este máximo disminuye conforme el centro de la nube se aleja de la fuente. Bajo suposiciones simples, el centro de la nube viaja a la velocidad del viento  $U$ , y la distancia que recorre en un tiempo  $t$ , se calcula con la ecuación 1.

Un cálculo básico con la ecuación 13 es estimar la concentración para receptores a ras de suelo y en dirección del viento ( $y=z=0$ ) (Ecuación 14).

$$C(x, y, z, t) = \frac{2M}{2\pi^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (14)$$

A continuación, en la tabla 13 se resumen las expresiones para estimar los coeficientes de dispersión  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  en función de la distancia, sobre el eje  $x$ .

Tabla 13. Fórmulas para estimar los coeficientes de dispersión

Formulación	Donde
Coeficientes de dispersión Para $Z_0 = 0.1$ m	$\sigma_x = 0.13X$ $\sigma_y = 0.5(a \cdot x^b)$ , $\sigma_z = c \cdot x^d$
Corrección por rugosidad para $\sigma_z$ ( $Z_0 \neq 0.1$ m)	$\sigma_z = c \cdot x^d(10Z_0)^m$ , $m = 0.53X^{-0.22}$

Fuente: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo: Documento NTP 475

La tabla 14 contiene los coeficientes para el cálculo de  $\sigma_y$  (valores promedio en un intervalo de 10 minutos) y  $\sigma_z$  (para una altura de emisión  $< 20$  m y una rugosidad del terreno de  $Z_0 = 0.1$  m) según la categoría de estabilidad:

Tabla 14. Parámetros para el cálculo de los coeficientes de dispersión

Clase de estabilidad	a	b	c	d
A	0.527	0.865	0.28	0.90
B	0.371	0.866	0.23	0.85
C	0.209	0.897	0.22	0.80
D	0.128	0.905	0.20	0.76
E	0.098	0.902	0.15	0.73
F	0.065	0.902	0.12	0.67

La tabla 15 contiene algunos valores de rugosidad válidos para ciertos tipos de terrenos. Estos coeficientes pueden emplearse para corregir los valores de  $\sigma_z$ .



Tabla 15. Valores de la rugosidad  $Z_0$  para diversos tipos de zonas

Clase de terreno	$Z_0$
Terreno llano con pocos árboles	0.03 m
Terreno agrícola (árboles abundantes, tierra arable)	0.10m
Terreno cultivado (cultivos, vegetación, casas aisladas)	0.30 m
Área residencial (construcción densa de poca altura)	1.0 m
Área urbana (edificios altos e industriales con estructuras altas)	3.0 m

Ejemplo 8. Ocurre una descarga instantánea de 1000 kg de  $\text{CH}_4$  con una densidad de  $0.665 \text{ kg/m}^3$ . Si la estabilidad atmosférica que predomina en esos momentos es de tipo neutra, la velocidad del viento es 2 m/s y la rugosidad del terreno 0.1 m, calcule la concentración a 400 m de distancia a sotavento a nivel del suelo a los 100 s de la emisión. La elevación de la nube resultante en función de su densidad es despreciable en este caso ( $h=0$ ). Considere una temperatura de 25 grados Celsius y una presión atmosférica de 1 atmósfera.

#### **Modelo de caja simple de la calidad del aire**

Este modelo asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas. Se deben establecer algunos parámetros como las dimensiones con viento a favor, viento de costado y las dimensiones verticales de la caja. También se debe establecer el periodo de tiempo de emisión de los contaminantes. En el modelo de caja se supone que las emisiones dentro de la caja y las que entran a esta se mezclan completamente de una manera inmediata con el aire disponible para la dilución. Además, por simplicidad se considera que los contaminantes son químicamente estables y que permanecen en el aire.

El gasto de masa, definido en la ecuación 15, denota la cantidad de material que entra por un área dada perpendicular a la dirección del flujo en la unidad de tiempo. El gasto de masa tiene las dimensiones de  $M/T$  y se calcula como el producto de la concentración del material,  $C$ , la velocidad  $U$ , y el área de flujo,  $A$ , esto es

$$m = CUA \quad (15)$$

La figura 15 muestra una caja rectangular de altura  $H$  como el volumen de control para estudiar la calidad del aire en una ciudad, un túnel o un cuarto.  $C_e$  denota la concentración del contaminante que entra a la caja en la corriente de velocidad  $U$ .  $L$ ,  $B$  y  $H$  son el largo, el ancho y el alto de la caja respectivamente;  $q_e$  representa la tasa de emisión por unidad de área dentro de la caja y  $C$  la concentración dentro de la caja al tiempo  $t$ .

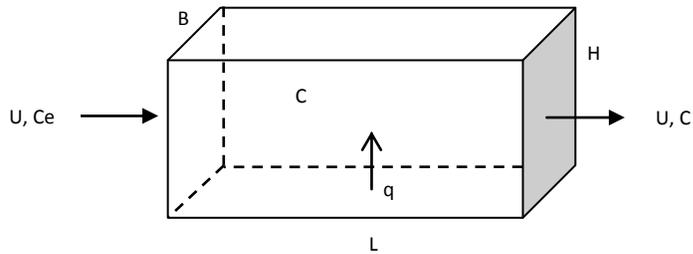


Figura 15. Diagrama del volumen de control para el modelo de caja simple

La ecuación 16 es la representación matemática de la ecuación de balance de masa para un contaminante conservativo y suponiendo volumen constante:

$$V \frac{dC}{dt} = UBHC_e + q_eLB - UCBH \quad (16)$$

Dividiendo toda la ecuación por el volumen de control, se puede reescribir la ecuación (16) del siguiente modo:

$$\frac{dC}{dt} + \frac{U}{L}C = \frac{UC_e}{L} + \frac{q_e}{H} \quad (17)$$

La ecuación (17) es una EDO lineal de primer orden con coeficientes constantes. Su solución, la ecuación (18) se obtiene aplicando el método para resolver una EDO de primer orden junto con la condición inicial  $C(t=0) = C_o$ .

$$C(t) = C_o e^{-\frac{U}{L}t} + C_e + \frac{q_e L}{UH} (1 - e^{-\frac{U}{L}t}) \quad (18)$$

La concentración de estado estacionario, dada por la ecuación 19 se puede obtener a partir de la ecuación 18 tomando el límite cuando el tiempo tiende a infinito.

$$C = C_e + \frac{q_e L}{UH} \quad (19)$$

También se puede obtener directamente de la ecuación 16 resolviendo la ecuación de estado estacionario ( $dC/dt = 0$ ).

Ejemplo 9. Del inventario de emisiones realizado en Tabasco, se obtuvo que el total de emisiones de monóxido de carbono en 2003 fue 108 062.90 t/año. Estas emisiones se estimaron con base en las ciudades de Villahermosa, Cárdenas y Comalcalco. Considere que la ciudad de Villahermosa se puede circunscribir en un rectángulo de 61.8 km<sup>2</sup> (L=6 km y B=10.3 km), suponga un viento medio mensual de 2 m/s, una altura de capa de mezcla de 1 km,  $C_e = 0$  y  $C_o = 0$ . Use la información de la tabla 16 para determinar la tasa de emisión por unidad de área de la ciudad de Villahermosa con base al número de habitantes y la concentración de CO en función del tiempo. Sugerencia: estime la velocidad del viento en km/d, la tasa de emisión en Kg/d y la tasa de emisión por unidad de longitud en Kg/km<sup>2</sup>-d. Compruebe que  $\text{kg}/\text{km}^3 = \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Tabla 16. Resumen del inventario de emisiones, Villahermosa, Tabasco.

Parámetro	Villahermosa	Cárdenas	Comalcalco	Total
Número de habitantes	520 308	217 261	164 637	902 206
Parque vehicular	93 231	10 948	10 556	114 735
Número de giros	2986	259	157	3402

Fuente: tercer informe de la calidad del aire (SEDESPA, 2003).

### **Transporte de largo alcance**

Los modelos gaussianos se consideran exactos para determinar las concentraciones de contaminantes hasta una distancia de 50 km de la fuente. Sin embargo, debido a diversas situaciones atmosféricas, los contaminantes pueden ser transportados más allá de 50 km. Algunos contaminantes como los compuestos de sulfuro, partículas finas y el ozono, que no se remueven rápidamente de la atmósfera, pueden ser transportados a distancias lejanas. Los modelos climáticos de gran escala y las variables atmosféricas tales como la luz solar y la precipitación pueden afectar el transporte de estos contaminantes. Las técnicas computarizadas para el análisis de trayectorias generalmente se usan para analizar el transporte y la transformación de estas sustancias. Estas técnicas consideran el flujo de una porción de aire contaminado.

## **5 MODELOS COMPUTACIONALES DE LA CALIDAD DEL AIRE**

Para lugares ubicados a sotavento de la fuente en terrenos relativamente planos, las concentraciones de contaminantes se pueden determinar por medio de la ecuación gaussiana de distribución u otra similar. Sin embargo, el uso de modelos computarizados para la dispersión atmosférica simplifica mucho más los cálculos de la concentración de contaminantes y permite aplicarlos en escenarios más complejos. El análisis de modelos puede darse en dos niveles: un nivel de sondeo y otro refinado.

**Modelo de sondeo.** El modelo de sondeo se realiza antes del refinado para obtener un panorama inicial al del tipo de concentración de contaminantes que se producirá debido a una determinada fuente. Consiste en modelos simples que emplean técnicas y suposiciones de estimación relativamente sencillas. Por consiguiente, los resultados son conservadores, e indican que si se ejecuta un modelo refinado, los estimados de la concentración de contaminantes no deberán ser mayores. El modelado de sondeo generalmente se realiza en primer término, con vistas a eliminar cualquier fuente que implicará un problema para la calidad del aire, o no contribuirá con esta. En los análisis de modelado refinado, no es necesario considerar las fuentes que no representan ningún problema para calidad del aire.

**Modelo refinado.** El segundo nivel de análisis es el modelado refinado. Este nivel consiste en cálculos más analíticos y complejos. Requiere información más detallada sobre la fuente, las condiciones meteorológicas y el terreno, así como mejor número de datos de entrada. Mientras que los modelos de sondeo asumen el "peor de los casos" para las condiciones meteorológicas y presupuestos simplificados sobre el terreno, los refinados incorporan información más completa sobre el terreno y la fuente, y emplean datos meteorológicos reales. Al incluir información más detallada en el modelo, se pueden obtener estimados más exactos y descriptivos sobre la concentración de los contaminantes para las áreas que rodean a la fuente.



### Tipos de modelos atmosféricos

Los modelos atmosféricos deterministas pueden clasificarse de diferentes maneras de acuerdo con el criterio que se tome como referencia, por ejemplo, su escala espacial, o bien, la forma en que plantean las ecuaciones que describen el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera.

Por su escala espacial, los modelos deterministas se pueden clasificar como modelos de:

- *Micro-escala*
- *Meso-escala*
- *Regionales*
- *Sinópticos y*
- *Globales.*

La tabla 17 describe la escala de longitud válida para estos modelos.

Tabla 17. Tipos de modelos atmosféricos

Modelo	Dominio típico	Resolución típica
Microescala	200x200x100 m	5m
Mesoescala (urbano)	100x100x 5 Km	2 Km
Regional	1000x1000x10 Km	20 Km
Sinóptico (continental)	3000x3000x20 Km	80 Km
Global	65,000x65,000x20 Km	5°x5°

Por la forma en que plantean las ecuaciones que describen el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, se les puede clasificar como:

- *Modelos eulerianos.* Que usan un sistema de coordenadas fijo con respecto a la tierra y,
- *Modelos lagrangianos.* Que usan un sistema de coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera.

Los *modelos eulerianos* representan la clase más sofisticada de modelos atmosféricos. En ellos las ecuaciones que describen el movimiento y la transformación química de los contaminantes en la atmósfera se resuelven considerando un sistema fijo de coordenadas y la región a modelar se puede dividir en celdas o cajas, tanto horizontal como verticalmente (Figura 16).

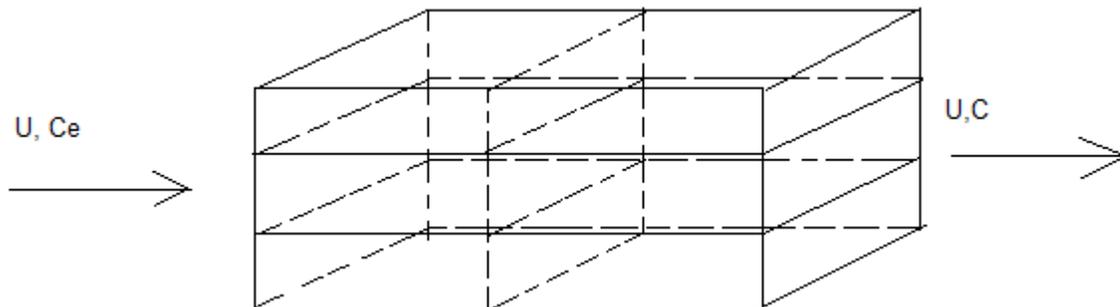


Figura 16. Una caja dividida en ocho celdas.



La concentración de los contaminantes en cada celda se estima a intervalos específicos de tiempo, tomando en cuenta la información sobre campos meteorológicos tridimensionales, así como las concentraciones iniciales de los contaminantes, las emisiones, el transporte, la dilución y las transformaciones químicas. La aplicación de estos modelos resulta más conveniente cuando existen patrones complejos de emisión (por ejemplo, numerosas y diversas fuentes de emisión, dispersas en un área geográfica amplia) y/o cuando los procesos de transformación química juegan un papel relevante en la generación y destino de los contaminantes (por ejemplo, para contaminantes secundarios). En general, cuando se cuenta con información suficientemente detallada sobre el inventario de emisiones, la calidad del aire y la meteorología, estos modelos pueden aplicarse para evaluaciones detalladas de calidad del aire a nivel urbano o regional.

Algunos ejemplos de modelos *eulerianos* son:

- Urban Airshed Model - UAM
- Multiscale Climate Chemistry Model - MCCM
- Comprehensive Air Quality Model with Extensions – CAMx
- Third Generation Air Pollution Modeling System - CMAQ
- Regional Acid Deposition Model – RADM

En cuanto a los *modelos lagrangianos*, éstos se caracterizan por hacer uso de un sistema de referencia que se ajusta al movimiento atmosférico. Es decir, las emisiones, reacciones, deposición y mezclado de los contaminantes se analizan para un volumen de aire que va cambiando su posición de acuerdo con la velocidad y dirección del viento –y no para una región entera como en los *eulerianos*. Bajo este esquema general, los *modelos lagrangianos* se pueden clasificar, de acuerdo con la geometría del sistema de modelación, como *modelos de trayectoria* y *modelos gaussianos*.

En los *modelos de trayectoria* se define una columna hipotética de aire que se desplaza bajo la influencia de los vientos dominantes y se asume que no hay intercambio de masa entre la columna y sus alrededores, excepto por las emisiones que ingresan a la columna por la base durante su recorrido (Seinfeld y Pandis, 1998). La columna se mueve continuamente de tal forma que el modelo estima la concentración de los contaminantes en diferentes lugares y momentos a partir de las concentraciones iniciales, las emisiones y las transformaciones químicas. Su aplicación es recomendable en evaluaciones de calidad del aire que consideren el transporte a grandes distancias, para modelar el comportamiento de masas individuales de aire e incluso para evaluar la calidad del aire en casos en los que existan limitaciones de información para caracterizar las emisiones y la meteorología de una región completa.

Entre los modelos de trayectoria se encuentran:

- California Institute of Technology Model - CIT, versión de trayectoria
- Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model – HYSPLIT
- Advanced Statistical Trajectory Regional Air Pollution Model –ASTRAP

Finalmente, en los *modelos gaussianos* se describe el transporte y mezcla de los contaminantes asumiendo que las emisiones presentan, en las direcciones horizontal y vertical, una distribución normal o de curva gaussiana con una concentración máxima en el centro de la pluma.



Generalmente estos modelos se aplican para evaluar la dispersión de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, aunque en ocasiones también se aplican para simular emisiones de fuentes de área y de línea. Otra característica de este tipo de modelos es que normalmente son aplicados para evaluar la dispersión de contaminantes primarios no reactivos, aunque existen versiones que incluyen en su formulación consideraciones especiales para poder simular procesos de deposición y transformación química. Algunos de los ejemplos de modelos gaussianos son:

- Industrial Source Complex –ISC
- AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD
- The Calpuff Modeling System
- Versatile Dispersión Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets -CALINE3
- Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations – CTDMPUS

En general, los modelos lagrangianos se han utilizado para las evaluaciones de riesgo a la salud asociadas con emisiones de fuentes individuales, siendo el modelo CALPUFF uno de los modelos más ampliamente usados (Levy et al., 2002; Zhou et al, 2003). En este modelo las emisiones se tratan como “puffs”, que experimentan procesos de transformación química al mismo tiempo que se van desplazando a través de un campo meteorológico tridimensional.

Portal para obtener datos de algunas sustancias químicas. La fuente es el INECC. La dirección es: <http://www2.inecc.gob.mx/dgicur/sqre/sustancias/busquedas.php>. También puede buscar cómo: Sistemas, Portales y Micrositios Ambientales, dentro de la página del INECC.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Castellanos A. (2008). *Aplicación de un modelo de dispersión para simular el comportamiento de las emisiones atmosféricas de las chimeneas del ingenio azucarero La Chontalpa (Santa Rosalía), Cárdenas, Tabasco*. Tesis de licenciatura no publicada, DACBiología-UJAT, Tabasco.
2. CEPIS (2005). *Curso de Autoinstrucción: “Conceptos básicos sobre la meteorología de la Contaminación del Aire”*. Recuperado de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/lecc4/lecc4\\_p.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc4/lecc4_p.html)
3. CEPIS (2005). *Curso de Autoinstrucción: “Orientación para el Control de la Contaminación del Aire”*. Recuperado de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_orientacion/index.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/index.html)
4. De Nevers N. (1998). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. México: McGraw Hill.
5. Gobierno del Distrito Federal (2006). *Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 137*. Recuperado de [http://www.consejeria.df.gob.mx/portal\\_old/uploads/gacetanoviembre06\\_17\\_137.pdf](http://www.consejeria.df.gob.mx/portal_old/uploads/gacetanoviembre06_17_137.pdf)
6. Espert V.A. & Lopez P.A.J. (2000). *Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera*. Universidad Politécnica de Valencia, España: U.P.V.
7. EPA (2000). *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. Recuperado de <http://www.epa.gov/scram001/guidance/met/mmgrma.pdf>
8. EPA (2000). *Guía del Usuario PCRAMMET*. Recuperado de <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/pcrams.pdf>
9. Jiménez E. (2012). *Inventario de emisiones de fuentes fijas no reguladas del municipio de Tenosique, Tabasco*. Tesis de licenciatura no publicada, DACBiología-UJAT, Tabasco.
10. Mannahan S. (2011). *Introducción a la Química Ambiental*. UNAM, México: Reverté
11. Mendoza V.M. (2002). *Inventario de emisiones atmosféricas por la actividad de las instalaciones petroleras en la zona central del estado de Tabasco*. Tesis de Maestría no publicada, DACBiología-UJAT, Tabasco.
12. Mihelcic J.R. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Ambiental*. México: Limusa Wiley
13. Schnelle K.B. & Dey P.R. (2000). *Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide*. New York: McGraw-Hill.
14. SEDESPA (2003). *Segundo informe de la calidad del aire del estado de Tabasco. Programa de administración de la Calidad del Aire*. Tabasco: Gobierno del Estado de Tabasco.
15. Wark K. & Warner C. (2006). *Contaminación del aire origen y control*. México: Limusa.