

TEMA 1.1

INTRODUCCIÓN Y FENÓMENOS DE DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

- Conoce los fundamentos básicos respecto de la problemática de la contaminación atmosférica, su origen y las causas que lo generan, tales como sustancias contaminantes, focos emisores, procesos y técnicas industriales, y la legislación nacional en cuanto a la calidad del aire.
- Conoce el concepto de dispersión de contaminantes y su importancia en la contaminación atmosférica para estimar la dispersión y transporte de contaminantes empleando modelos de caja y gaussiano.

Modelos de difusión turbulenta

- Es el transporte de masa, calor o movimiento dentro de un sistema debido a los movimientos dependientes del tiempo aleatorias y caóticas.
- Se produce cuando los sistemas de fluidos turbulentos alcanzan condiciones críticas en respuesta al flujo de cizallamiento, que resulta de una combinación de gradientes empinados de concentración, gradientes de densidad, y las altas velocidades.
- Ha sido extremadamente difícil desarrollar un modelo concreto y totalmente funcional que se puede aplicar a la difusión de una especie en todos los sistemas turbulentos debido a la incapacidad para caracterizar tanto una instantánea y predijo la velocidad del fluido de forma simultánea.
- En el flujo turbulento, esto es el resultado de varias características tales como la imprevisibilidad, rápida difusividad, altos niveles de vorticidad fluctuante, y la disipación de la energía cinética

Bases modelización de la calidad del aire

Concepto y marco de referencia



- Complemento a las mediciones
- Diseño de medidas de control y de diseño sobre fuentes puntuales
- Definición de planes y políticas
- Información pública

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (u_j C_i) = D_j \frac{\partial^2 C_i}{\partial x_j^2} + R_i(C_1, \dots, C_N, t) + S(\bar{x}, t) + \begin{cases} \text{C.I.} \\ \text{C.C.} \end{cases}$$

● **Historia de los modelos**

- Primeras teorías sobre difusión y transporte atmosférico (años 20 y 30)
- Primeros modelos numéricos meteorológicos (años 50 y 60)
- Década de los 70: lanzamiento de ISC3, primeros modelos de mesoescala y módulos químicos (smog fotoquímico)
- Años 80-90: ordenadores más potentes, modelos menos simplificados (condiciones hidrostáticas, incompresibilidad, etc.)
- Décadas 1990: desarrollo de la ciencia meteorológica y gran despliegue de los modelos numéricos de alta resolución
- Siglo XXI: mayor refinamiento teórico, mayor resolución (CFD), modelos on-line

- **Escalas de los procesos atmosféricos**

Aspecto fundamental para el diseño y aplicación de los modelos de contaminación.

Según Orlanski (1975):

- **Macroescala** (extensiones características mayores de 1.000 Km). Flujo atmosférico asociado a fenómenos sinópticos. Aproximación hidrostática.
- **Mesoescala** (extensiones características entre 1 y 1.000 Km). Fenómenos ligados a la heterogeneidad de los balances energéticos pero también por los efectos hidrodinámicos.
- **Microescala** (extensiones características por debajo de 1 Km). Dominio de efectos hidrodinámicos y gran influencia de la superficie. Ej: street canyon.

Existen numerosas clasificaciones al respecto; por ejemplo la propuesta por Jacobson (1999):

Escala	Dimensión característica	Ejemplos
Molecular	$\ll 2$ mm	Difusión molecular, viscosidad molecular
Microescala	2 mm – 2 km	Remolinos, penachos, desarrollo de cúmulos
Mesoescala	2 – 2.000 km	Tormentas, vientos locales, contaminación urbana
Sinóptica	500 – 10.000 km	Sistemas de altas y bajas presiones, frentes, agujero antártico en la capa de ozono
Planetaria o global	> 10.000 km	Sistemas globales de vientos, ondas de Rossby, reducción de la capa de ozono, calentamiento global

● Tipos de modelos

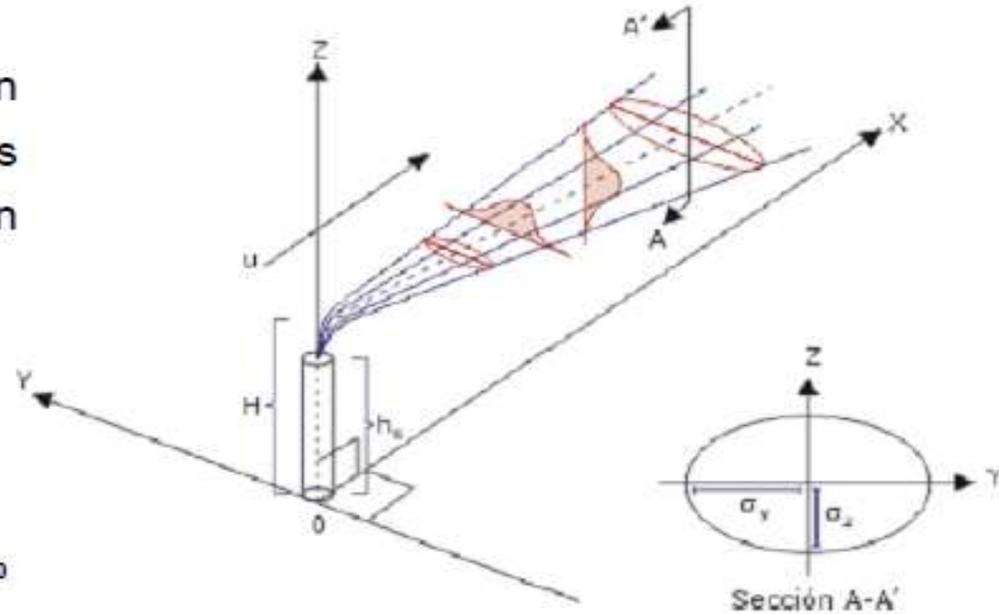
Los modelos que describen la dispersión y transporte de los contaminantes en la atmósfera pueden clasificarse según diversos criterios:

- la escala espacial (global, regional, etc)
- la escala temporal (episódicos, de largo periodo (estadísticos))
- según el tratamiento de las ecuaciones de transporte (eulerianos, lagrangianos)
- según el tratamiento de otros procesos (químicos, deposición seca y húmeda)
- según la complejidad del método

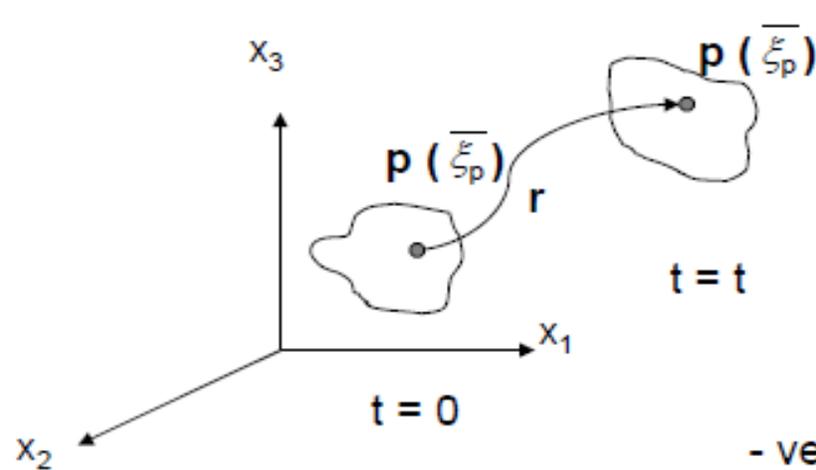
Basándose en la clasificación propuesta por Zannetti (1993), pueden distinguirse las siguientes categorías de modelos:

- **Modelos de sobreelevación del penacho.** Calculan el desplazamiento vertical (flotación, momento) del penacho a la salida de la chimenea. Predominan los de tipo semiempírico.

- **Modelos gaussianos.** Son los más comunes de los modelos de contaminación atmosférica.



- **Modelos lagrangianos.** Se basan en el seguimiento de la evolución de una determinada cantidad de partículas ficticias previamente seleccionadas. Incluyen los modelos de segmentos, bocanadas o partículas. La descripción de los fenómenos físicos dinámicos tiene más sentido físico pero tienen peor tratamiento matemático.



Descripción lagrangiana del movimiento (Euler)

$\bar{\xi}_p = \bar{\xi}_p(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ - etiqueta de la partícula p

$\bar{r} = \bar{r}(\bar{\xi}_p, t)$ - trayectoria de la partícula p

$\bar{x} = \bar{x}(\bar{\xi}_p, t)$ - posición de la partícula p

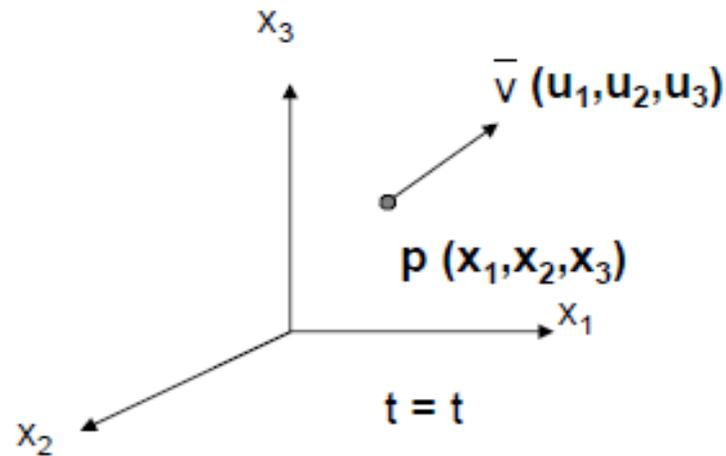
$$\bar{v}(\bar{\xi}, t) = \frac{d}{dt}(\bar{r}(\bar{\xi}, t))$$

- velocidad (derivada total, material o sustancial)

$$\bar{a}(\bar{\xi}, t) = \frac{d^2}{dt^2}(\bar{r}(\bar{\xi}, t))$$

- aceleración (derivada material de la velocidad)

- **Modelos eulerianos.** El espacio se discretiza en celdas y las ecuaciones (balance de materia p.e.) se tratan de forma local. Muy apropiados para la aplicación de métodos de resolución numérica.



Descripción euleriana del movimiento (D'Alembert)

$\bar{v}(\bar{x}, t)$ - descripción de la velocidad local; función de cada punto

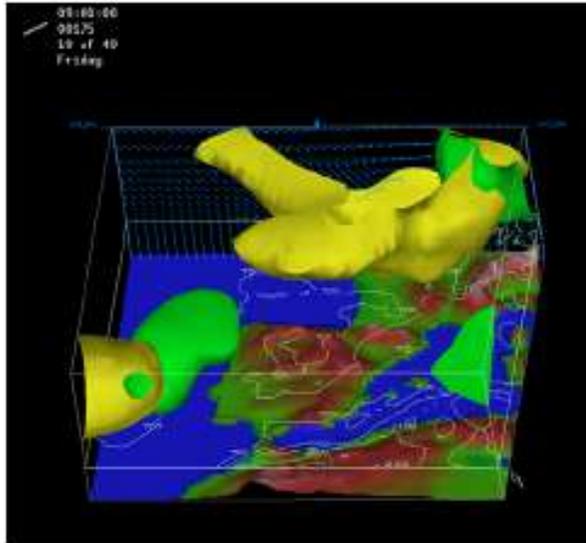
$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}$ - aceleración local

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_i}$$

- aceleración total o material = aceleración local + aceleración convectiva o término de arrastre

- **Modelos de recepción.** En contraste con los modelos de dispersión, los modelos de recepción arrancan de las concentraciones observadas en el receptor e intentan distribuir dichas concentraciones en el punto de muestreo entre varios tipos de fuentes
- **Modelos estocásticos.** Basados en técnicas estadísticas o semiempíricas para analizar tendencias, periodicidades e interrelaciones entre la calidad del aire y las mediciones realizadas con fines de pronóstico inmediato.
- **Modelos deterministas simples.** Se basan en datos empíricos y se formulan en términos de relaciones algebraicas. Incluyen la modelización de los índices de contaminación del aire (relación inmisión – efectos en la salud).

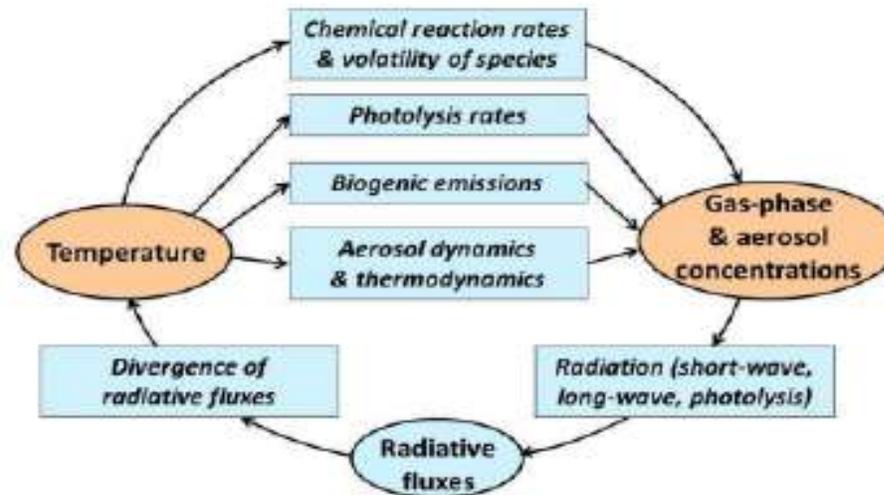
- **Modelos meteorológicos.** Los modelos meteorológicos se dirigen a comprender los fenómenos meteorológicos locales, regionales y globales y a suministrar los datos de entrada de tipo meteorológico que requieren los modelos de dispersión de contaminación atmosférica. Los modelos meteorológicos numéricos incorporan ecuaciones tanto de diagnóstico como de pronóstico.



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = X_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = X_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{array} \right.$$

Ecuación de Navier-Stokes para fluidos incompresibles

- Modelos on-line meteorología-química. En contraste con la aproximación clásica, la meteorología y la química se resuelven simultáneamente. Es una aproximación más realista ya que se tienen en cuenta las interacciones bidireccionales que existen entre la meteorología y la composición de la atmósfera; por ejemplo, la concentración de contaminantes depende de la temperatura, los balances radiativos y los patrones de viento y viceversa.



Esquema conceptual de los impactos de la temperatura en los niveles de concentración de contaminantes y viceversa (Bacskanov et al., 2013)

● **Ámbito de aplicación**

La contaminación atmosférica engloba numerosos procesos que involucran a múltiples sustancias y se verifican a muy diversas escalas



Diversidad de técnicas de simulación

Escala del proceso atmosférico		Microescala	Mesoescala	Macroescala	
Escala del fenómeno de dispersión		Local	Local a regional	Regional a continental	Global
Tipo de modelo	Sobreelevación del penacho	1, 2, 4			
	Gaussiano / estacionario	1, 2, 4	1, 2 a		
	Euleriano	1, 2, 4	2, 3, 4 b	2, 3, 4 c	2, 4
	Lagrangiano	4	4	2, 4 d	
	Receptor	(1, 2), 4	2, 3, 4	2, 4	2, 4
	CFD	4, (2)			
	Química/meteorología on-line		4	4	

Finalidad:

1 - Con fines regulatorios

3 - Información pública

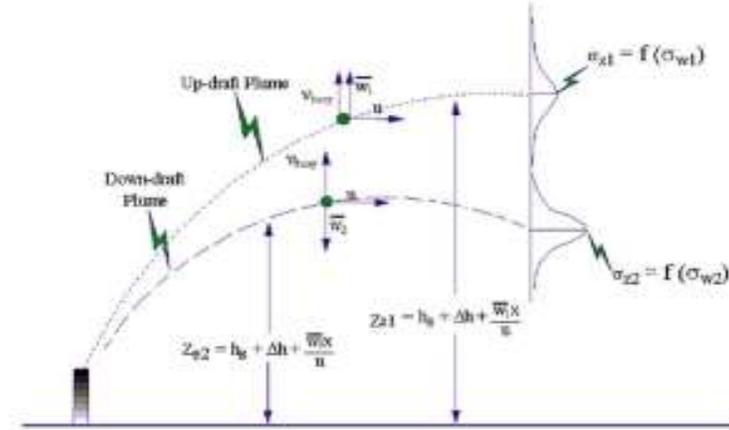
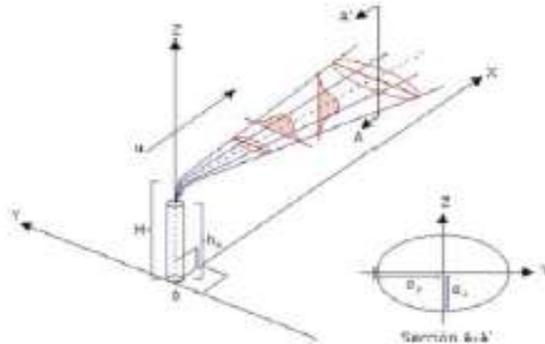
2 - Como apoyo para la definición de políticas

4 - Investigación científica

● a. Modelos estacionarios

Modelos profusamente utilizados en estudios de evaluación de impacto para fuentes puntuales

- Se basan en un modelo estacionario que surge de la integración de la ecuación de advección-difusión y en diversas formulas empíricas de sobreelevación inicial del penacho

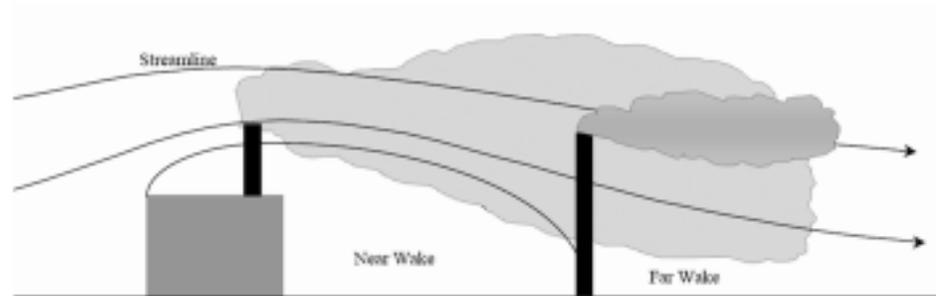


$$C_d(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q f_p}{\sqrt{2 \pi \bar{u}}} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z - \Psi_{\sigma j} - 2mz_1)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + \Psi_{\sigma j} + 2mz_1)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right]$$

$$\Delta h_d = \left[\frac{3F_m x}{\beta_f^2 u_p^2} + \left(\frac{3}{2\beta_f^2} \frac{F_b x^2}{u_p^3} \right) \right]^{1/3}$$

- Los modelos estacionarios de última generación, incluyen parametrizaciones avanzadas y tratamiento explícito de numerosos fenómenos físicos:
 - formulación específica en función de la estructura de la capa límite
 - consideración de la modificación del flujo debido a la topografía
 - procesos de deposición seca y húmeda
 - inclusión de mecanismos químicos simplificados

- consideración de los efectos aerodinámicos de edificios en las inmediaciones de la fuente



$$\begin{cases} \frac{d}{ds} (\rho U_{zc} r^2) - 2r \alpha \rho_a |U_{zc} - U_a \cos \Phi| + 2r \beta \rho_a |U_a \sin \Phi| \\ \frac{d}{ds} (\rho U_{zc} r^2 (u - U_a)) - r^2 \rho_w \frac{dU_a}{dz} \\ \frac{d}{ds} (\rho U_{zc} r^2 w) - gr^2 (\rho_a - \rho) \end{cases}$$

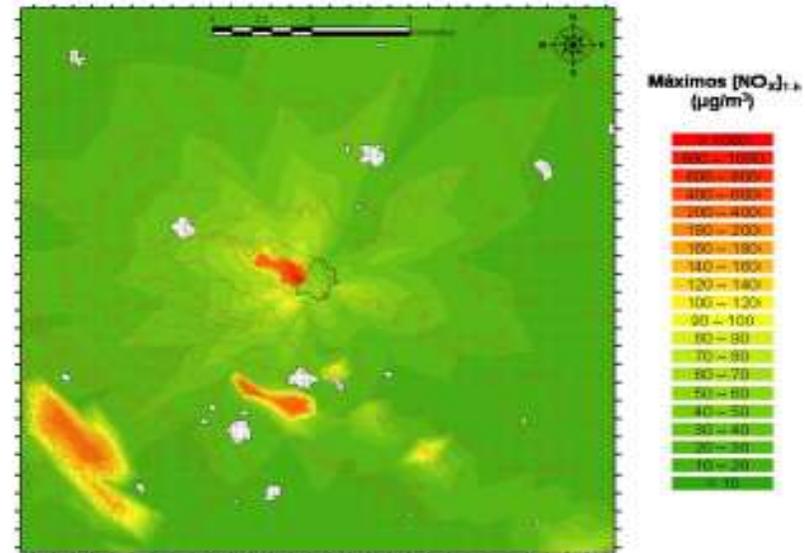
- Estos modelos generan resultados razonables a escala local útiles para comparar contra los límites legales:



- Relativamente sencillos
- Permiten un tratamiento muy detallado de distintos tipos de fuentes y permiten evaluar efectos locales con alta definición

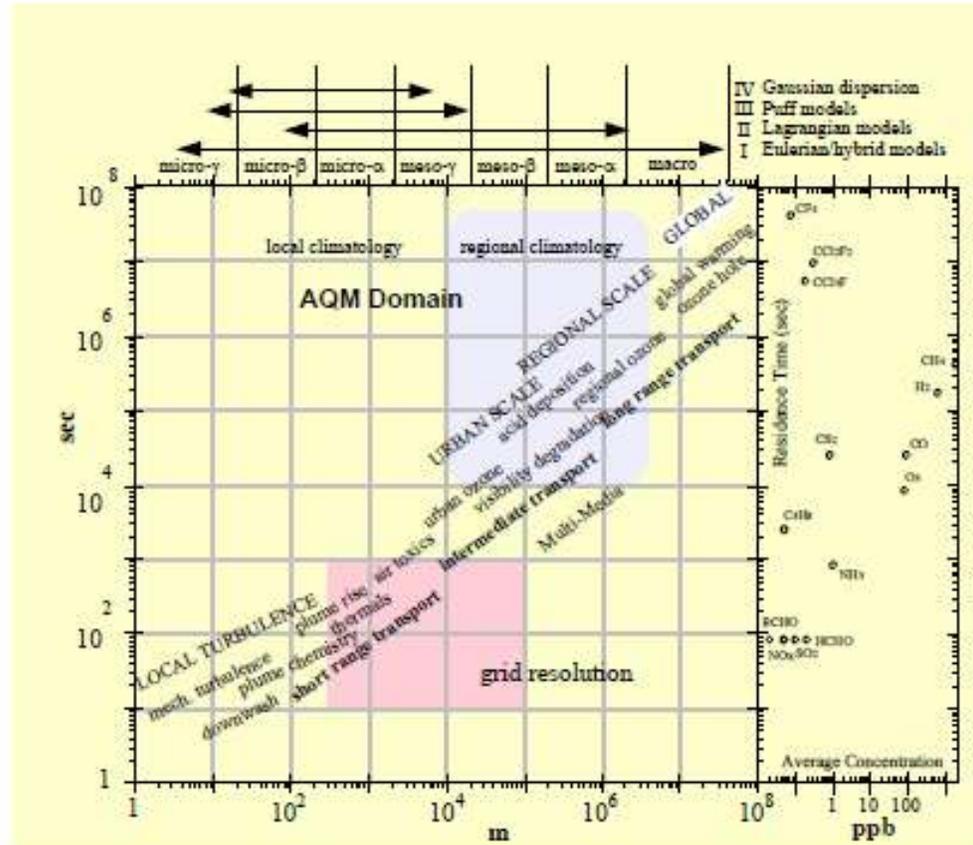


- Son muy sensibles a los datos meteorológicos
- Tienen limitaciones severas en casos de contaminantes muy reactivos o interacción de muchas fuentes



● b. Modelo eulerianos – planes y políticas

- Normalmente este tipo de modelos se asocian a la mesoescala, pero realmente pueden cubrir un amplio rango de escalas espaciales y temporales gracias a concepción escalable de la representación de los procesos dinámicos
- Estructura modular y código versátil con inclusión de un amplio abanico de esquemas fisico-químicos variables en función de la escala (p.ej. Nubes o difusión horizontal)
- Parametrizaciones a escala inferior al de la celda (p.ej. plume-in-grid)

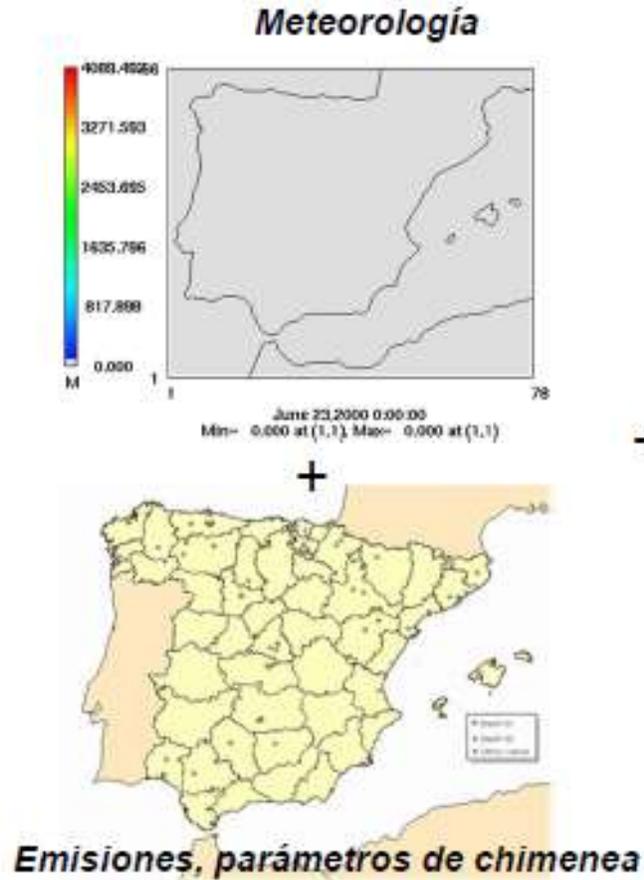


- Concepción holística de los procesos atmosféricos:
 - Modelos multiescala (urbana a continental)
 - Modelos multicontaminante (incluyendo ozono y aerosoles secundarios)
 - Múltiples mecanismos químicos, esquemas físicos e integradores numéricos

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\bar{c}_i J_s)}{\partial t} + m^2 \nabla_s \cdot \left(\frac{\bar{c}_i J_s \bar{V}_s}{m^2} \right) + \frac{\partial(\bar{c}_i J_s \bar{v}^3)}{\partial \hat{x}^3} + \\
 & -m^2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}^1} \left[\frac{\bar{\rho} J_s}{m^2} \left(\hat{K}^{11} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^1} \right) \right] - m^2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}^2} \left[\frac{\bar{\rho} J_s}{m^2} \left(\hat{K}^{22} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^2} \right) \right] \\
 & - \frac{\partial}{\partial \hat{x}^3} \left[\bar{\rho} J_s \left(\hat{K}^{33} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^3} \right) \right] \\
 & = J_s R_i(\bar{c}_1, \dots, \bar{c}_N) + J_s Q_i + \frac{\partial(\bar{c}_i J_s)}{\partial t} \Big|_{cid} + \frac{\partial(\bar{c}_i J_s)}{\partial t} \Big|_{aero}
 \end{aligned}$$

- a - tasa de variación de la concentración de la especie i
- b – advección horizontal
- c – advección vertical
- d – difusión turbulenta horizontal
- e – difusión turbulenta vertical
- f – reacción química
- g – emisiones
- h – procesos relacionados con las nubes
- i – procesos relacionados con aerosoles

El modelo de calidad del aire está íntimamente relacionado con el modelo meteorológico y el modelo de emisiones:



+

$$\Delta h_m = 3,0 \frac{v_s d_c}{u}$$

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{u^3} \right)^{1/3} \text{ with}$$

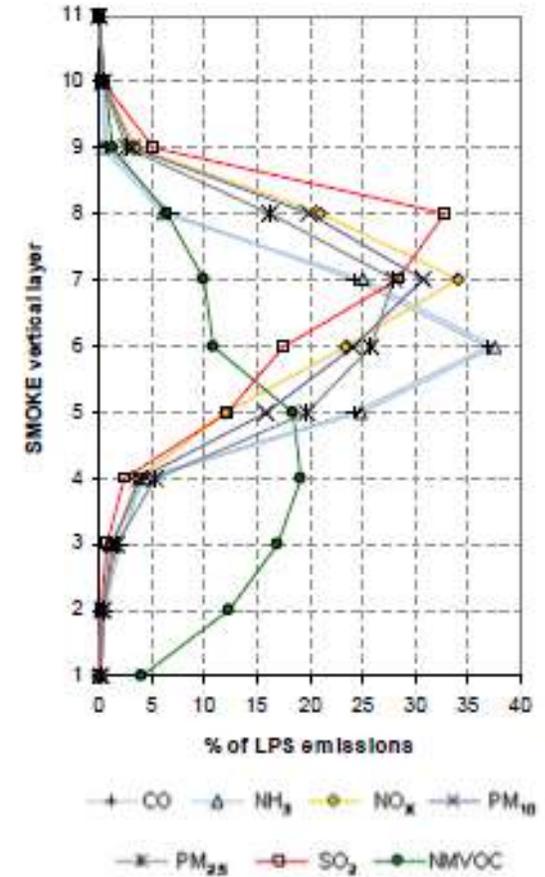
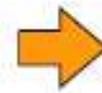
$$F_b = g \frac{T_s - T_a}{T_c} \frac{v_s d_c^3}{4} \quad s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \Theta}{\partial z}$$

$$\Delta h = 1,2 \left(\frac{F_b}{u u_c^3} \right)^{3/5} \left(h_s + 1,3 \frac{F_b}{u u_c^2} \right)^{3/5}$$

$$\Delta h = 30 \left(\frac{F_b}{u} \right)^{3/5}$$

$$F_r = \frac{u_1 \Delta Z_p}{2,664} u_c^2 \left(\frac{\Delta Z_p}{h_s + \frac{2}{3} Z_p} \right)^{3/5}$$

$$F_r = \frac{u_1 s \Delta Z_p^3}{59,319} \quad F_r = u_1 \left(\frac{\Delta Z_p}{30} \right)^{5/3}$$

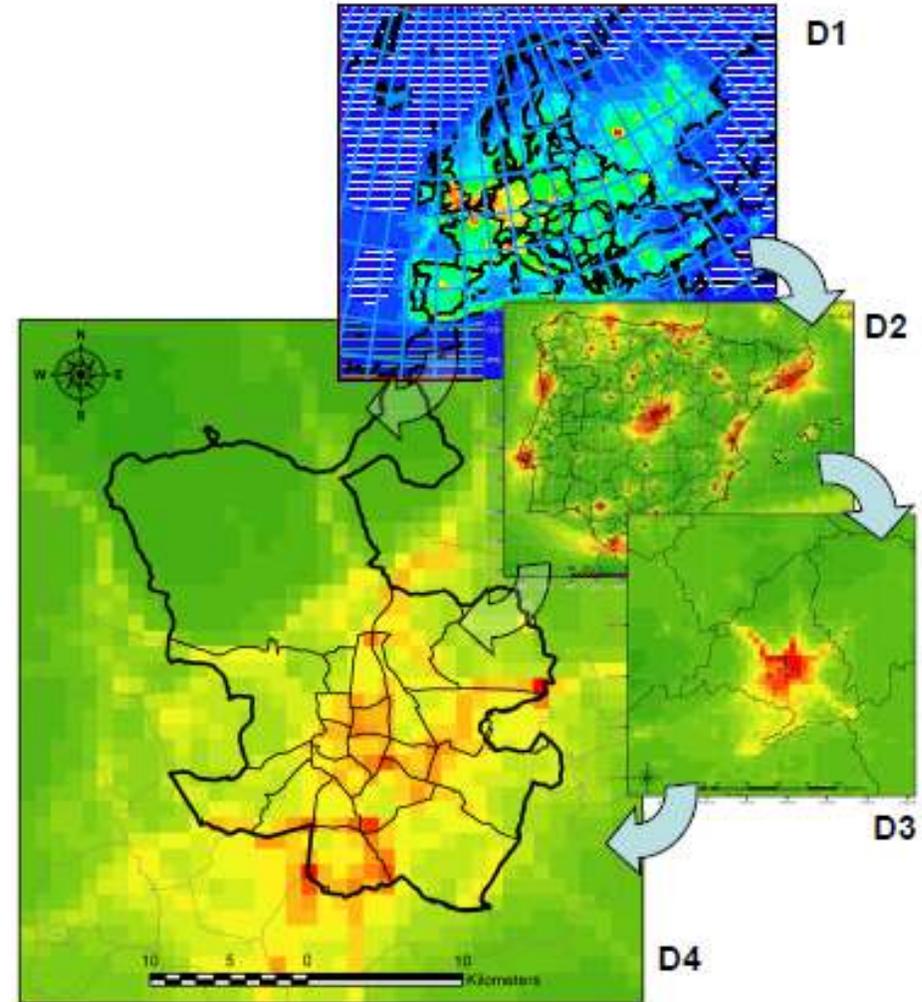




- El sistema permite la evaluación integral de la calidad del aire a mesoescala bajo distintos escenarios
- Adecuado para la evaluación de proyectos, planes y programas



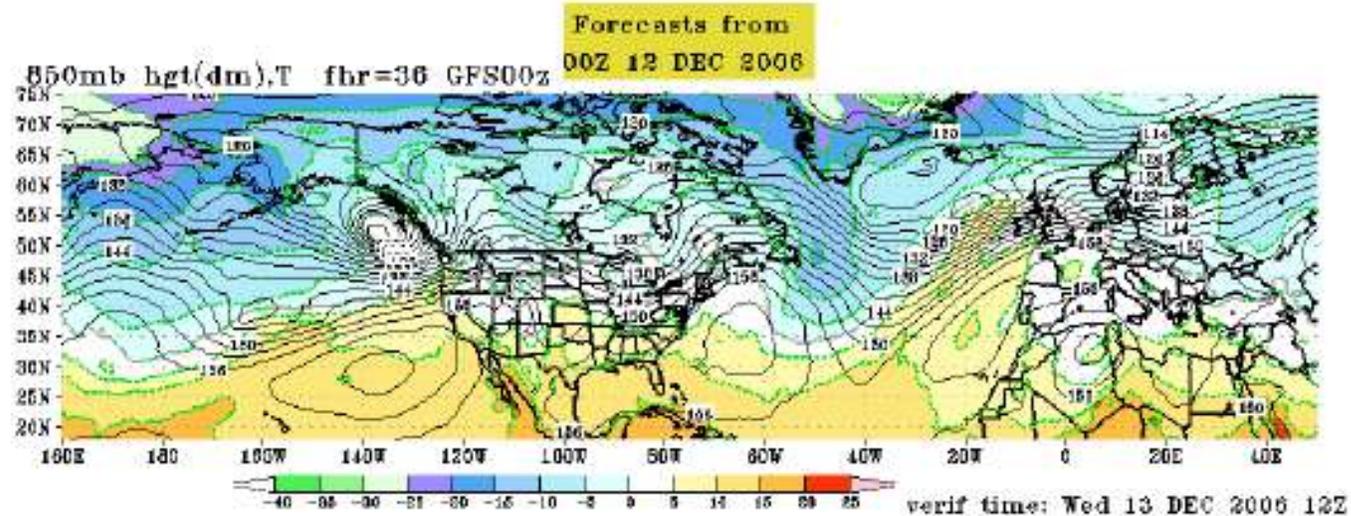
- Dificultad y complejidad del preprocesado y generación de información específicas
- Muy altos requerimientos de cálculo



- c. Modelo eulerianos - pronóstico

Modelos de pronóstico que permiten prever la calidad del aire en las próximas horas o días

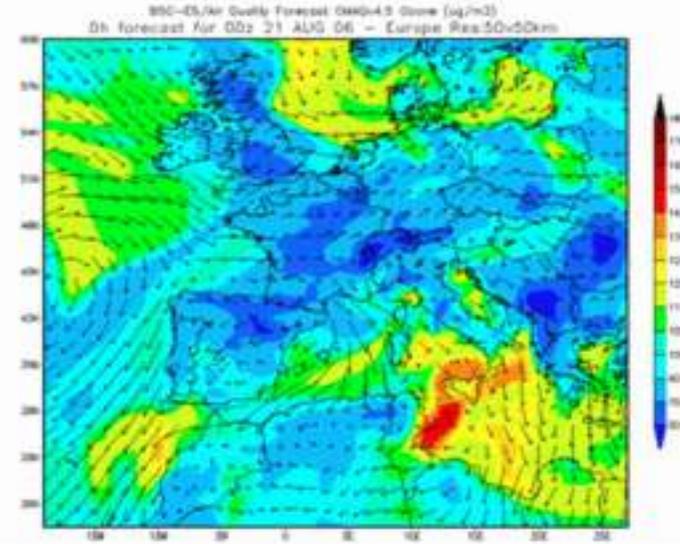
- Se basan en la incorporación en tiempo real de predicciones meteorológicas globales



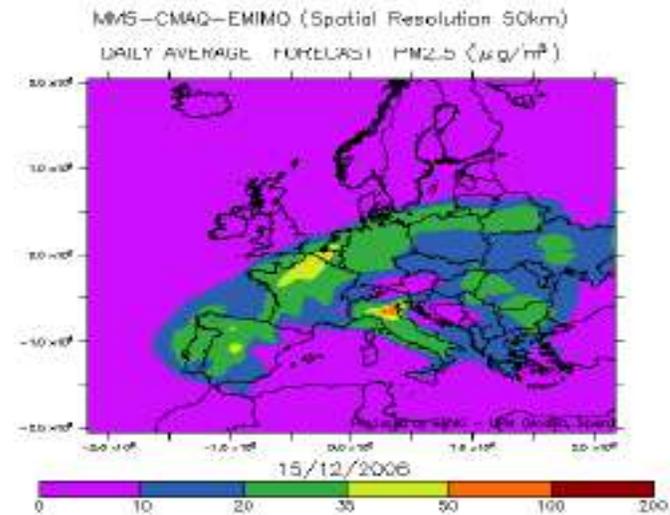
- Muy variables en función de la escala espacial



- Permiten anticiparse a situaciones que podrían generar niveles altos de contaminación (especialmente interesante para fuentes industriales)
- Útiles para la información del público



- Requiere una predicción inmediata de las emisiones muy precisa
- Se pierde capacidad operativa con la escala

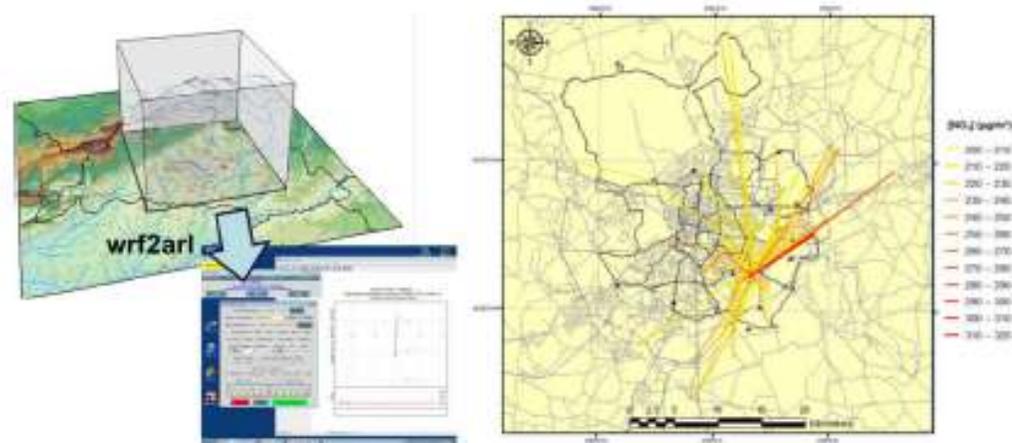
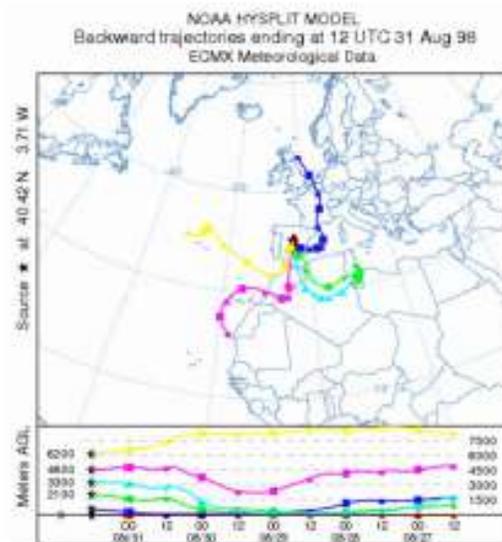


● d. Modelo lagrangiano (retrotrayectorias)

La reconstrucción de retrotrayectorias tridimensionales permite evaluar la contribución de la contaminación transfronteriza

- Se basan en reanálisis atmosféricos o salidas de otros modelos meteorológicos tridimensionales

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5 [V(P,t) + V(P', t+\Delta t)] \Delta t$$

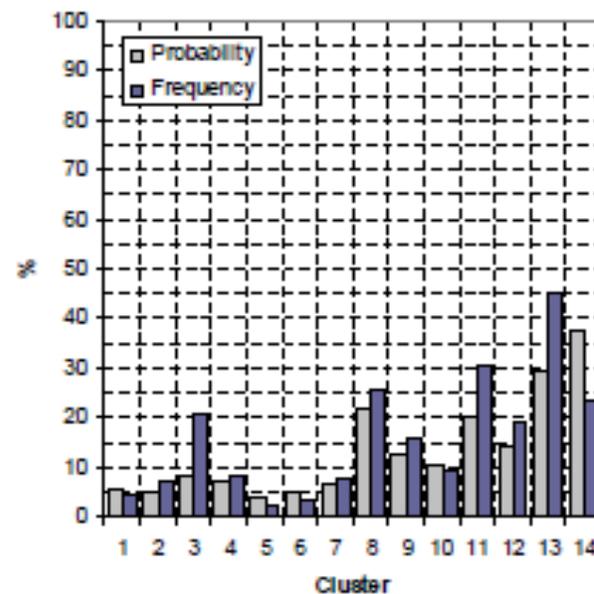




- El análisis de retrotrayectorias aporta una información valiosa sobre posibles fuentes de contaminación transfronteriza
- Permite matizar o interpretar el establecimiento de límites de inmisión



- Las trayectorias individualmente tienen una alta incertidumbre
- El sistema no contempla relaciones causales



Probabilidad y frecuencia de excedencia del umbral diario de PM_{10} en Madrid

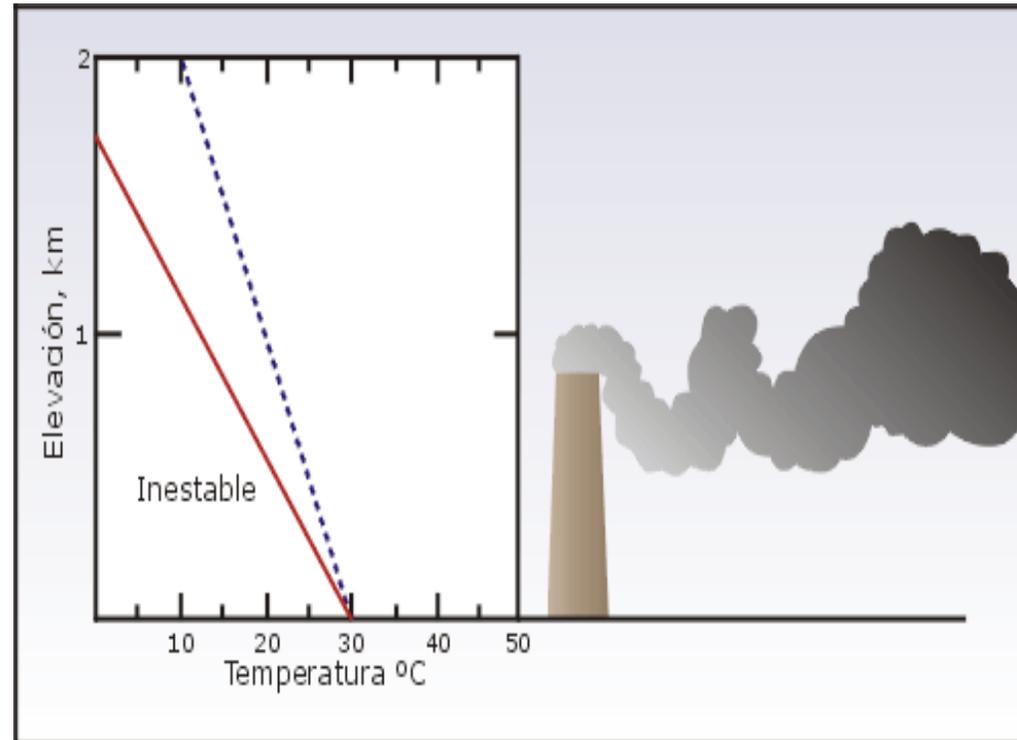
● Conclusiones y comentarios

- En la actualidad se dispone de gran variedad de sofisticadas herramientas para la modelización de la calidad del aire, diseñadas para abordar la simulación de distintos aspectos específicos de la contaminación
- No obstante, cualquier modelo es una simplificación de la realidad y no existe ninguno infalible
- Los errores e incertidumbres se derivan tanto de las limitaciones intrínsecas del modelo como de los datos de entrada
- La calidad de los resultados está completamente condicionada a la calidad de la información de partida. Los datos y condiciones de aplicación de un modelo son tan condicionantes como el modelo en sí

- Es fundamental evidenciar estas limitaciones así como profundizar en su naturaleza para plantear una solución de compromiso en cada caso
- Pese a sus limitaciones, los modelos suponen una herramienta útil e incluso imprescindible (como en este caso) para una gestión eficaz de la calidad del aire
- En cada caso debe aplicarse el modelo o conjunto de modelos más apropiados en función de los requerimientos del problema y la información disponible
- Un aspecto fundamental en el uso de modelos en general y de la discusión en relación a la aptitud de un sistema para un caso concreto radica en la transparencia del análisis

FORMACIÓN DE "PENACHOS"

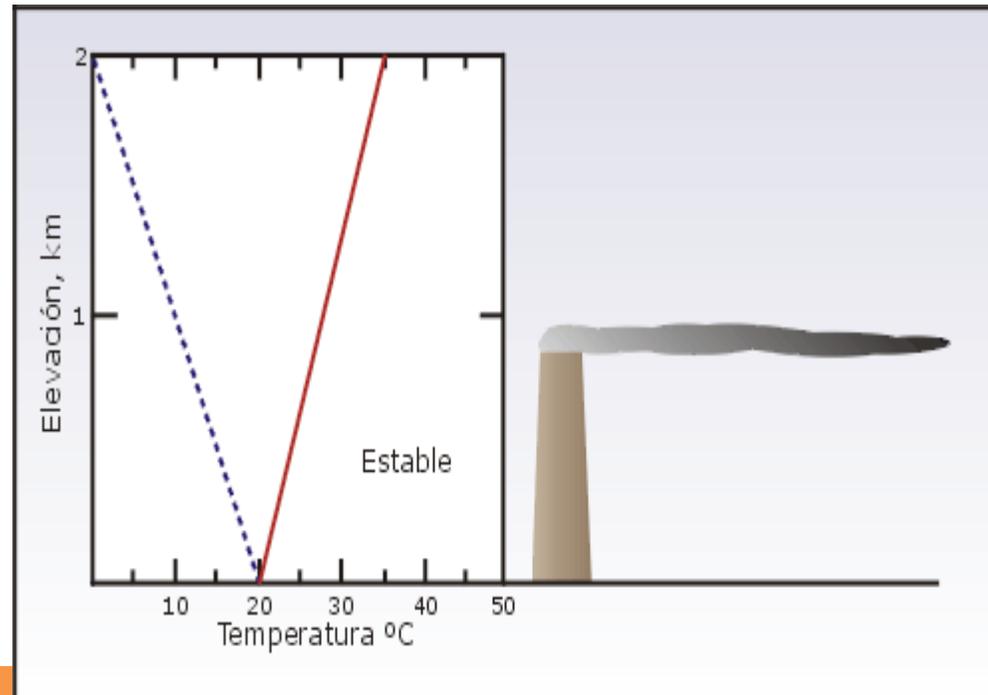
• Penacho de espiral: condiciones muy inestables generalmente favorables para la dispersión. Algunas veces se pueden producir altas concentraciones momentáneas al nivel del suelo



Penacho de abanico: condiciones estables

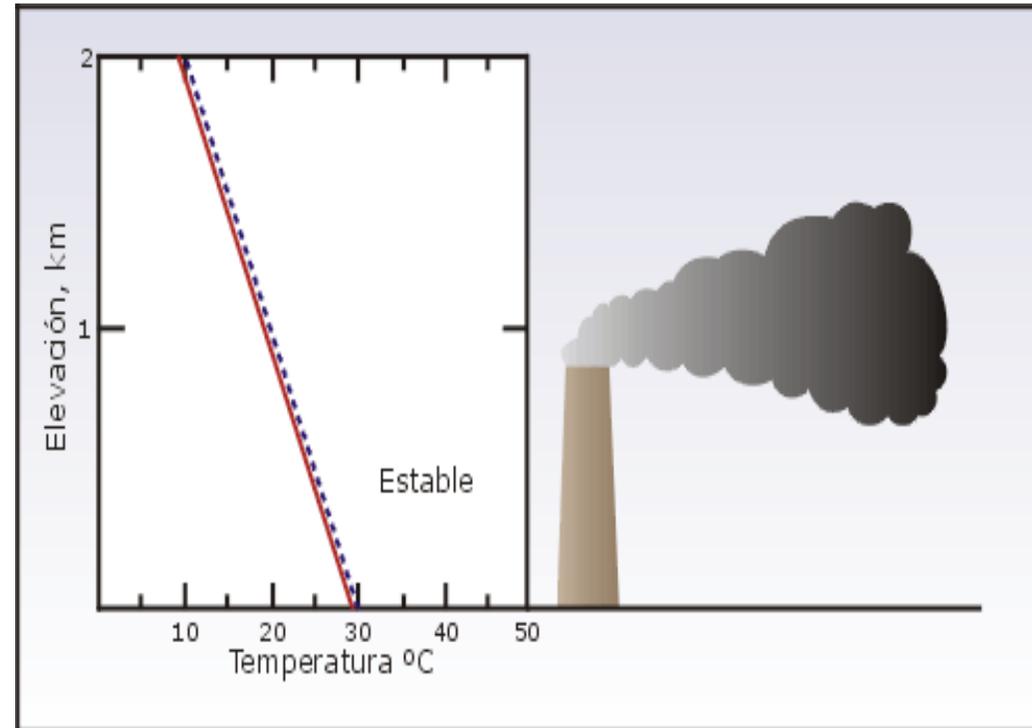
Una inversión impide el movimiento vertical pero no el horizontal y el penacho se puede extender varios km a sotavento de la fuente

Ocurren con frecuencia en las primeras horas de la mañana (inversión por radiación)



Penacho de cono: condiciones neutrales o ligeramente estables

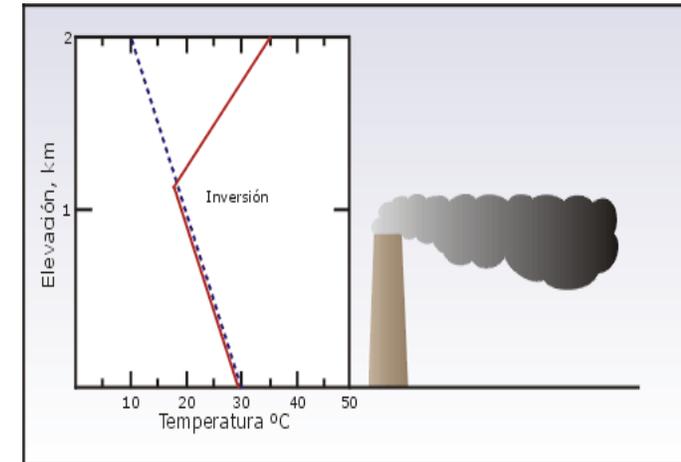
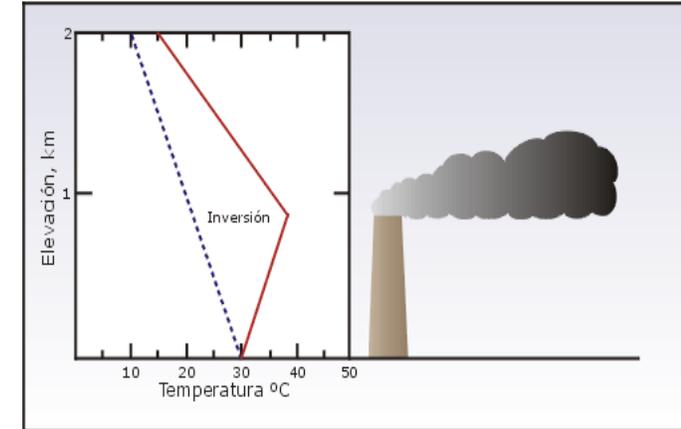
Mayor probabilidad de producirse entre la interrupción de una inversión por radiación y el desarrollo de condiciones diurnas inestables



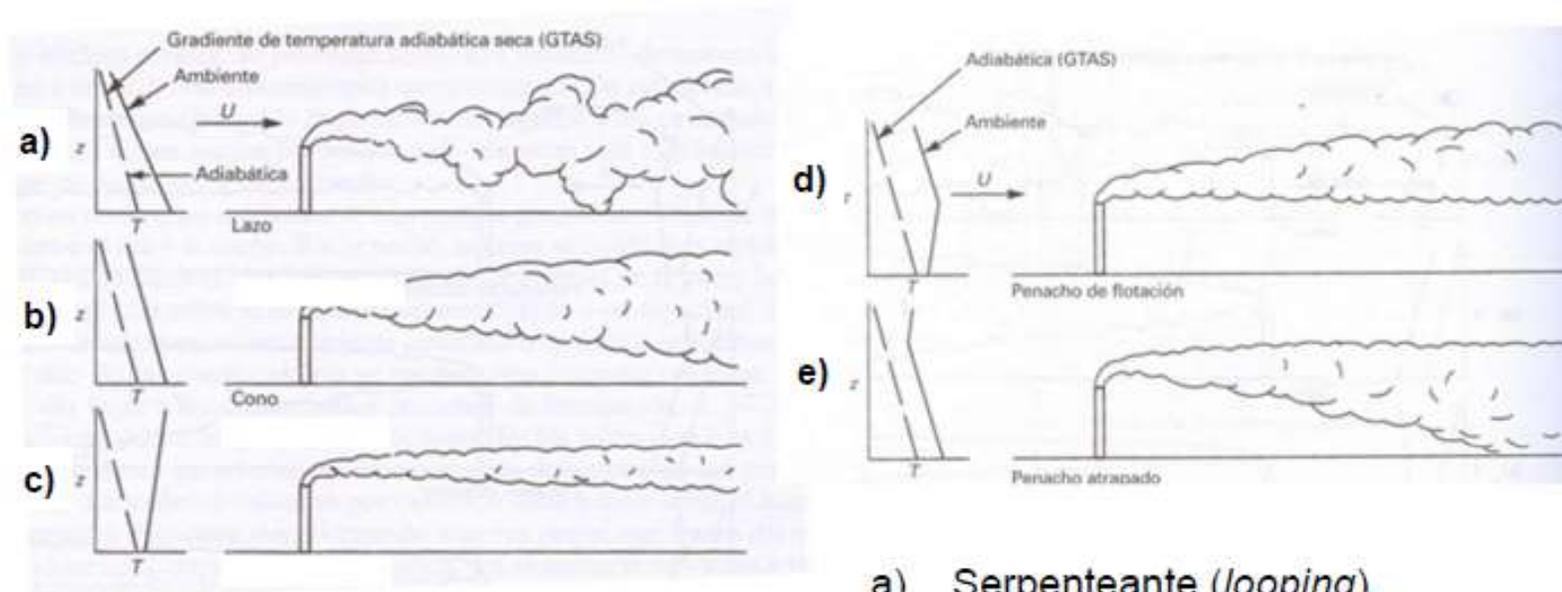
Formación de "penachos"

• Penacho de flotación: Condiciones inestables por encima de una inversión

• Penacho de fumigación: Se forma justo debajo de una capa de inversión y puede producir una grave situación de contaminación



Influencia general de la estabilidad atmosférica en la forma del penacho



- a) Serpenteante (*looping*)
- b) Cónico (*coning*)
- c) Tubular (*fanning*)
- d) Antifumigante (*lofting*)
- e) Fumigante (*fumigating*)

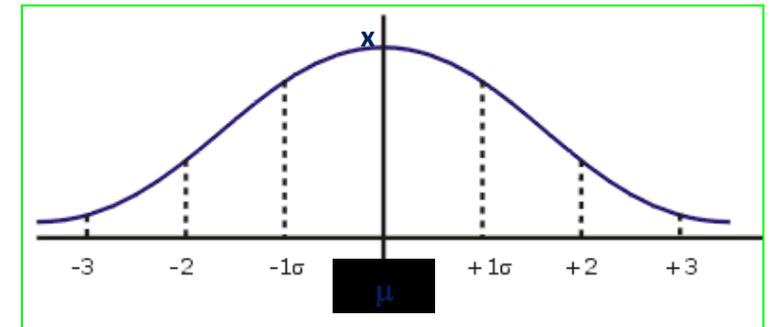
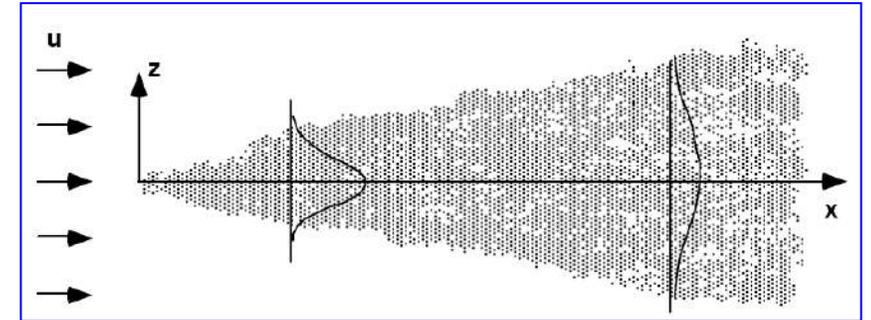
Modelo Gaussiano para contaminantes que no reaccionan

La concentración de contaminante es máxima en el eje del penacho, disminuyendo hacia los bordes (distribución normal o de Gauss)

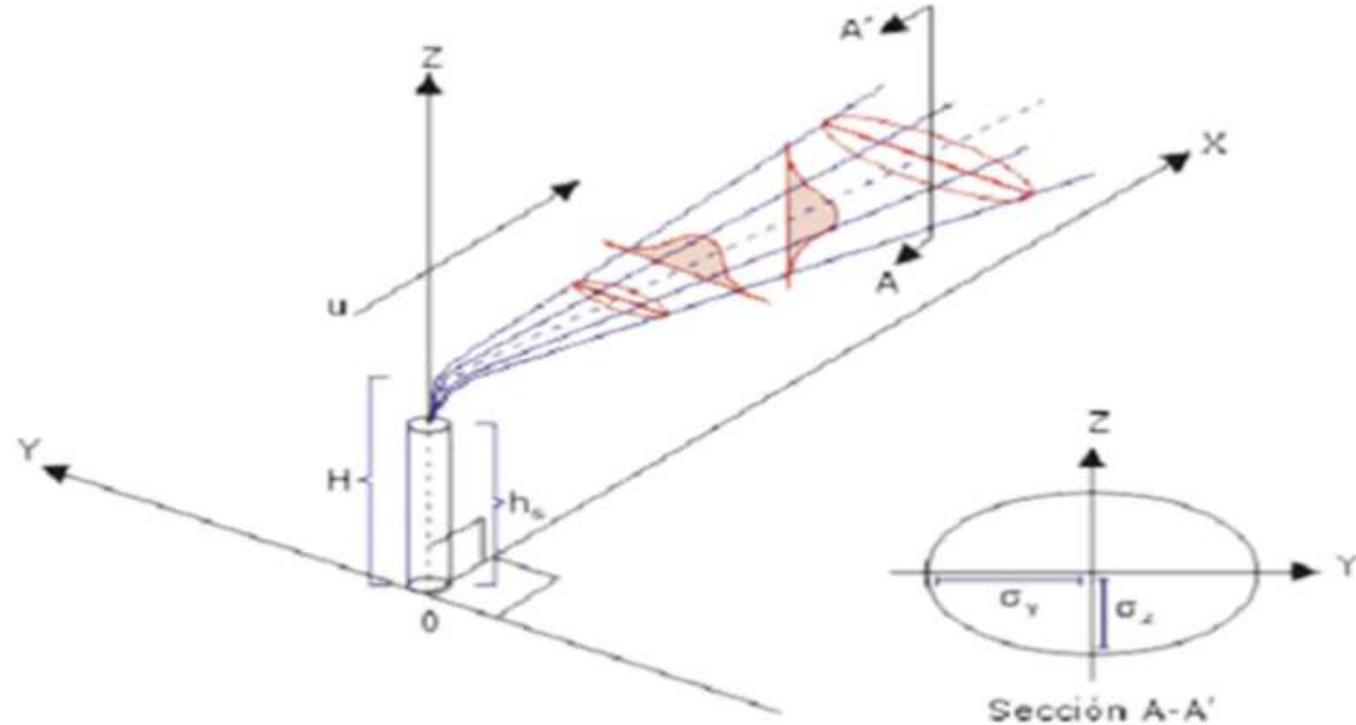
Hipótesis fundamental del modelo gaussiano

La concentración de contaminantes en las direcciones perpendiculares a la del viento puede ser descrita utilizando una distribución normal o de Gauss como la de la figura (campana de Gauss) cuya forma depende de los parámetros μ y σ Suponiendo constantes la tasa de emisión, Q (masa de contaminante emitida en la unidad de tiempo) y las condiciones atmosféricas, se llega a un estado estacionario, en la cual el penacho adquiere una forma constante en el tiempo

- μ (valor medio) indica la posición de la campana (parámetro de centralización)
- σ es el parámetro de dispersión o desviación estándar



MODELO GAUSSIANO



*Representación esquemática
del penacho gaussiano. Turner, 1970*

Δh = sobreelevación del penacho. A calcular según fórmulas de Briggs

Variación velocidad viento con altura:

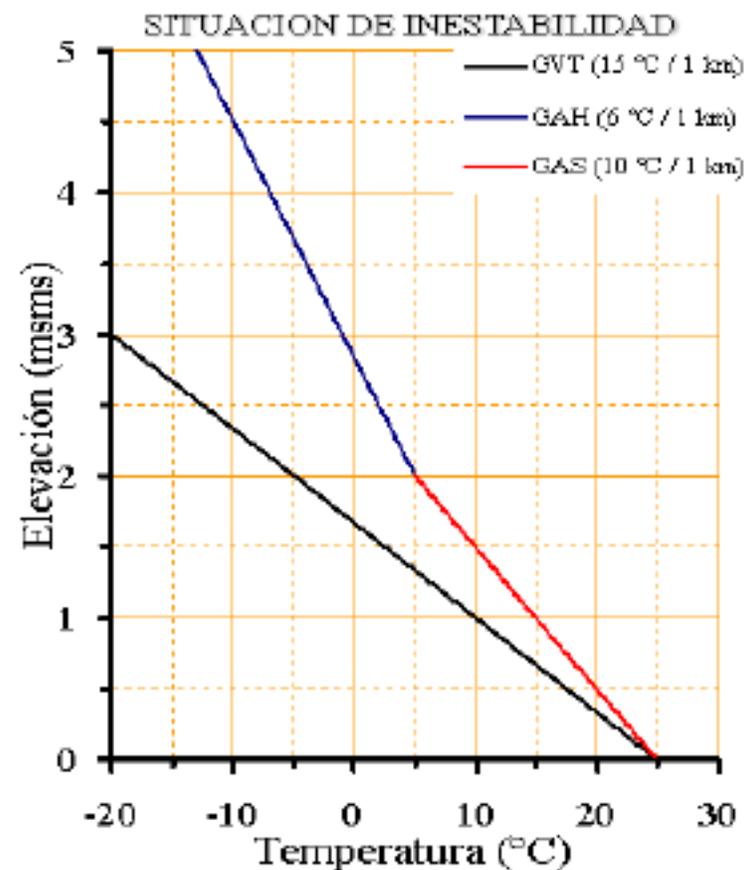
$$u = u_1 \cdot (z/z_1)^n \quad 0 < n < 1$$

El exponente n depende del grado de estabilidad. Se toma igual a 0,1 para situaciones inestables, 0,14 para neutralidad y 0,4 para estabilidad.

Inestabilidad atmosférica

Si una parcela de aire es forzada a ascender hasta los 1000 metros de altitud y el GVT del aire que la circunda es mayor que el GAS, la parcela de aire continuará ascendiendo aunque cese la fuerza que la impulsó inicialmente.

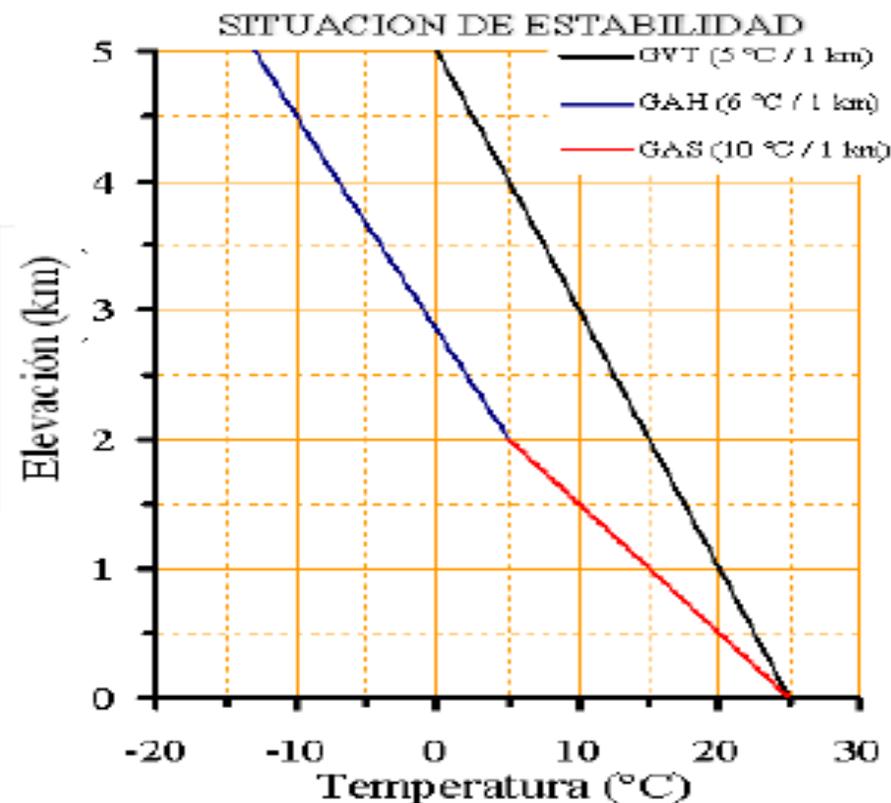
Cuando la parcela de aire alcanza el nivel de condensación continua ascendiendo según el GAH a la vez que se forman nubes con un gran desarrollo vertical.



Estabilidad atmosférica

Si una parcela de aire es forzada a ascender hasta los 1000 metros de altitud y el GVT del aire que la circunda es menor que el GAS, la parcela de aire tendrá una temperatura inferior a la del aire que la circunda y descenderá hasta su posición inicial.

Si la parcela de aire es forzada a ascender hasta 3000 metros de altitud y supera el nivel de condensación se formarán nubes, pero si el GVT es menor que el GAH la parcela también descenderá.



Determinación de la clase de estabilidad (múltiples métodos; 2 ejemplos):

Clase de estabilidad	Tipo de estabilidad	Gradiente térmico vertical (°C/100 m)
A	Muy inestable	Menor de -1,9
B	Inestable	De -1,9 a -1,7
C	Ligeramente inestable	De -1,7 a -1,5
D	Neutra	De -1,5 a -0,5
E	Ligeramente estable	de -0,5 a +1,5
F	Estable	Mayor de +1,5

a) Clases de estabilidad según el gradiente vertical de temperatura



b) Clases de estabilidad según parámetros en superficie (SRDT)



Velocidad del viento a 10 m (m/s)	Radiación solar (W/m ²)			
	> 925	675-925	175-675	< 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

Los coeficientes de difusión pueden calcularse como:

$$\sigma_y = a \cdot x^p$$

$$\sigma_z = b \cdot x^q$$

Índices de los coeficientes de difusión según clases de estabilidad

Clase de estabilidad	Valor del Índice		
	a	b	p y q
A	0,40	0,41	0,91
B	0,36	0,33	0,86
C	0,36	0,30	0,86
D	0,32	0,22	0,78
E	0,31	0,16	0,74
F	0,31	0,06	0,71

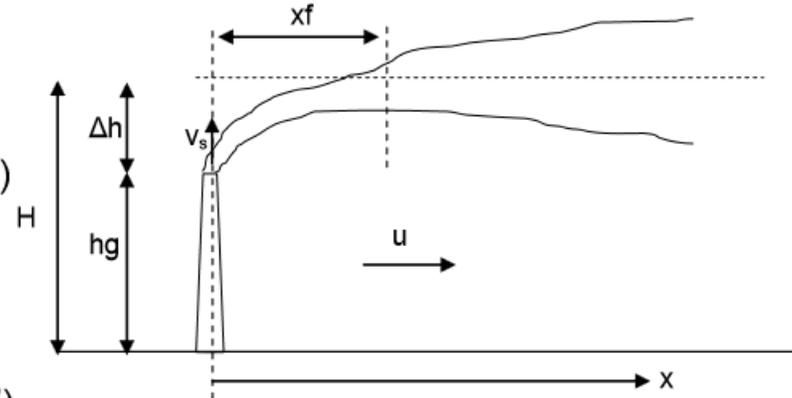
En condiciones neutras o inestables

Sobreelevación del Penacho según Briggs

$$\Delta h = 1,6 \frac{\sqrt[3]{F} \sqrt[3]{x^2}}{u}$$

Δh = sobreelevación del penacho (m)

$$F = \frac{g v_s \varnothing^2 (T_s - T)}{4 T_s}$$



g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

v_s = velocidad de salida en la chimenea (m/s)

T_s = temperatura de salida de los gases (K)

T = temperatura ambiente (K)

D_s = diámetro interno de la chimenea (m)

x = distancia en la dirección del viento desde la base de la chimenea (m)

u = velocidad del viento (m/s)

La distancia a la que el penacho alcanza su sobreelevación máxima se calcula

$$x_f = 49 \cdot F^{5/8}, \text{ si } F < 55$$

$$x_f = 119 \cdot F^{2/5}, \text{ si } F \geq 55$$

Para atmósfera estable

$$\Delta h = 1,6 \cdot F^{1/3} \cdot x^{2/3} \cdot 1/u$$

La distancia a la que el penacho alcanza su sobreelevación máxima se calcula

$$x_f = 3,14 \cdot u/S^{1/2}$$

Para distancias $x \geq x_f$

$$\Delta h = 3,4 \cdot (F / u \cdot S)^{1/3}$$

Para calmas

$$\Delta h = 5 \cdot F^{1/4} / S^{3/8}$$

$$S = 0.02 \cdot g/T \text{ (s}^{-2}\text{)}$$

para atmósfera moderadamente estable (Clase E de Pasquill-Gifford)

$$S = 0.035 \cdot g/T \text{ (s}^{-2}\text{)}$$

para atmósfera estable (Clase F de Pasquill-Gifford)

Concentración de un contaminante según el modelo de Pasquill-Gifford

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot e^{-1/2 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-1/2 \cdot \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-1/2 \cdot \left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

C(x, y, z, H): concentración de inmisión en el punto (x, y, z) para una altura efectiva de chimenea H ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

x: coordenada en la dirección del viento (m)

y: coordenada transversal a la dirección horizontal del viento (m)

z: coordenada vertical (m)

H: altura efectiva (m) considerada como la suma de la altura real geométrica de la chimenea (hg) con la sobreelevación del penacho (Δh)

Q: caudal másico del contaminante ($\mu\text{g}/\text{s}$)

u: velocidad del viento a la salida del penacho (m/s)

σ_y : coeficiente de difusión transversal o desviación típica transversal del penacho respecto a su línea central (m)

σ_z : coeficiente de difusión vertical o desviación típica del penacho en la vertical respecto a su línea central o eje (m)

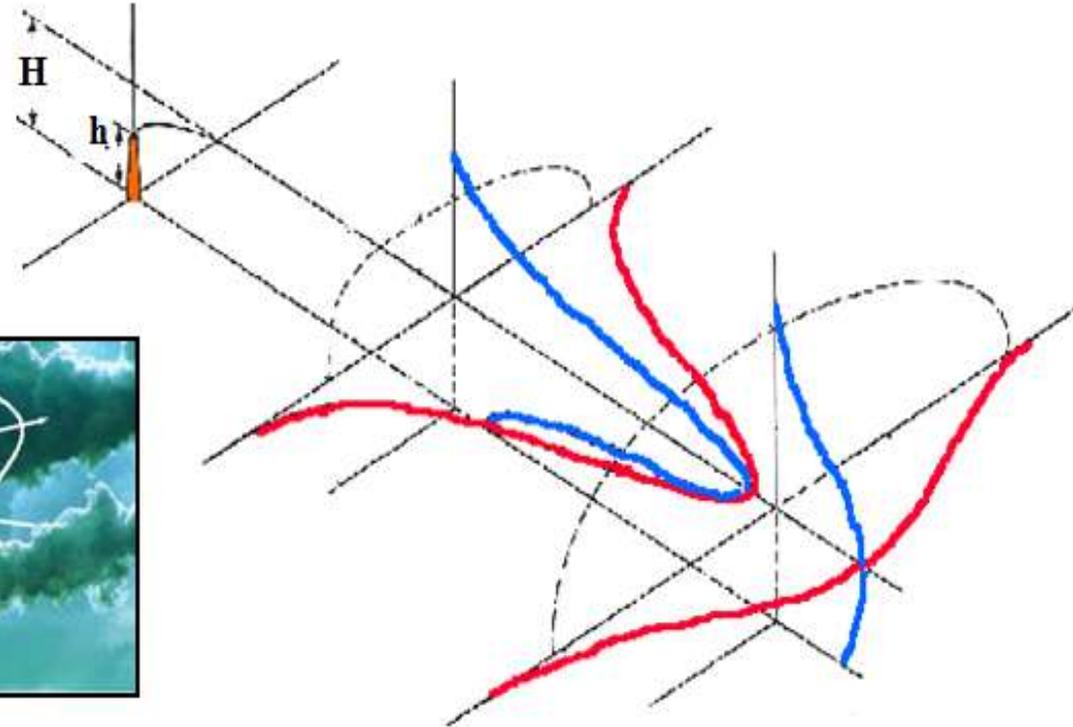
La concentración de un contaminante a nivel del suelo

$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-1/2 \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2}$$

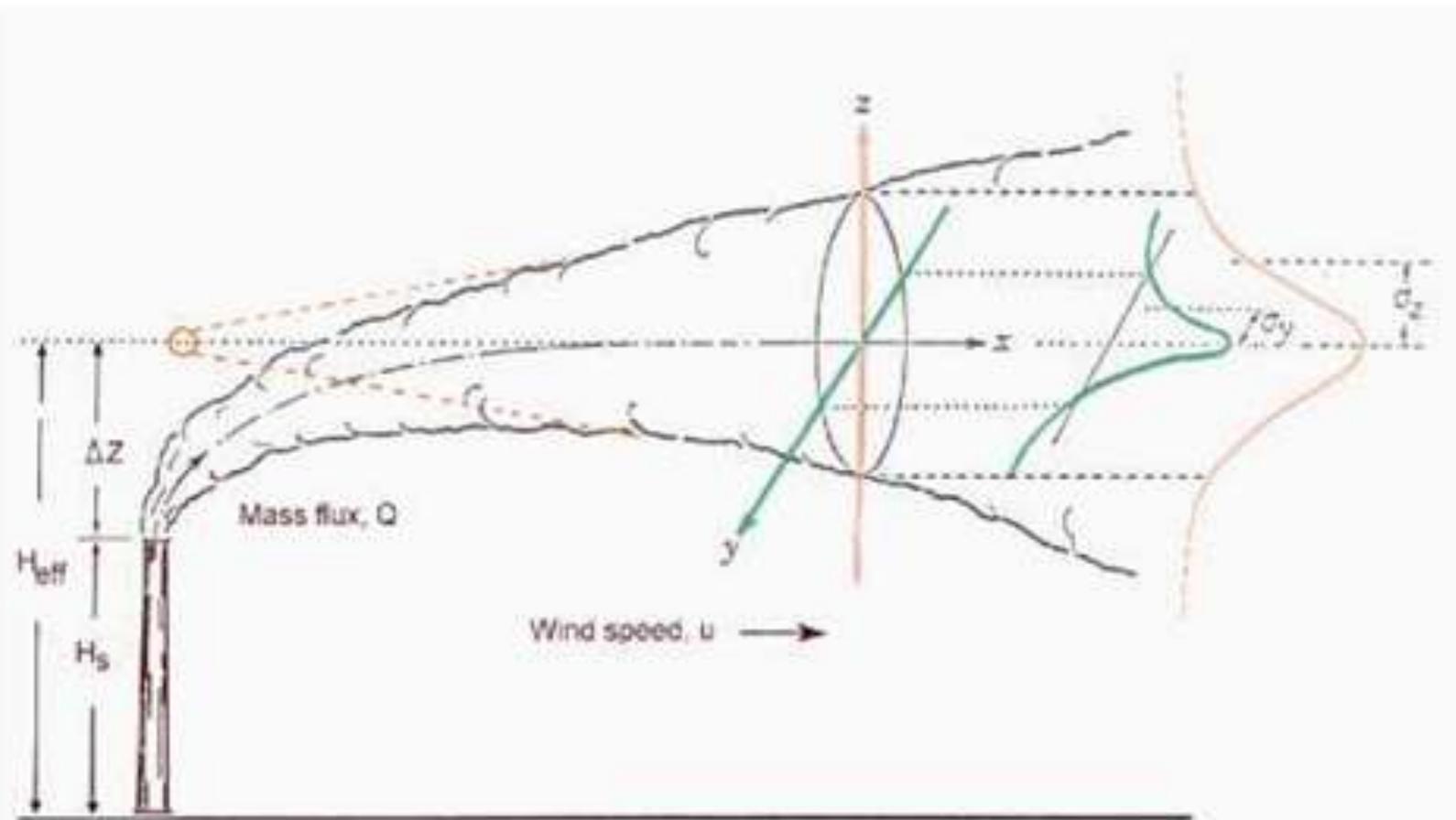
La máxima concentración previsible

$$C_{\max}(x, 0, 0, H) = \frac{2Q}{e \cdot \pi \cdot u \cdot H^2} \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$$

que se produce a una distancia (x_{\max}) en la que $\sigma_z = H/(2)^{1/2}$



$$c(x, y, z) = \frac{Q}{u 2\pi \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} \right) \right]$$



EJERCICIO

La chimenea de una fábrica emite $21 \frac{g}{s}$ de NOx. La chimenea tiene 40m de altura y 1m de diámetro y la velocidad de salida de los gases es de $10 \frac{m}{s}$ a una temperatura de 200°C. Se mide una velocidad del viento de $2.5 \frac{m}{s}$ a **10m del suelo** con una temperatura ambiente de 20°C, una presión de 1atm y una radiación de $890 \frac{W}{m^2}$ en estas condiciones.

Calcular:

- Clase de estabilidad y valor de los coeficientes de difusión a 2500 m de distancia de la chimenea.
- Concentración de NOx a nivel del suelo a 2500 m de distancia de la chimenea en la dirección del viento.
- Concentración máxima de NOx a nivel del suelo.

Si la relación $\frac{NO}{NOx}$ en emisiones del 90% en volumen y la concentración de ozono en la atmósfera es de 60 ppb estimar (asumir la única reacción relevante en esa escala temporal es la de oxidación del NO en presencia de O₃.)

- Concentración máxima de NO₂ $\frac{ug}{Nm^3}$