

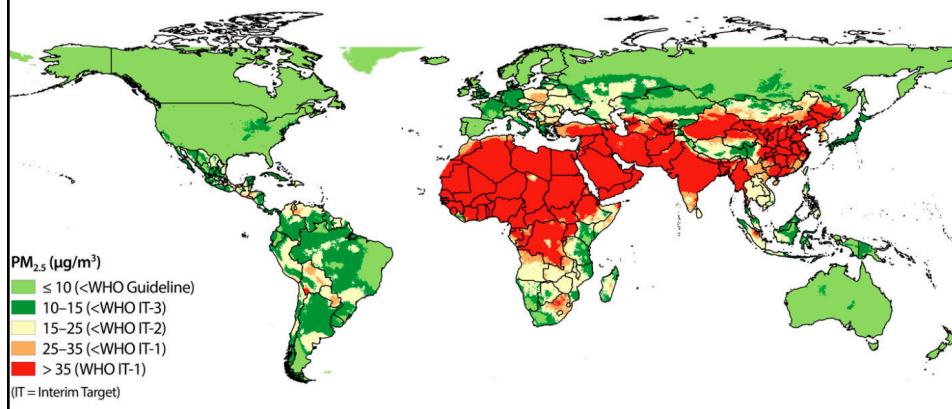
Tema 14 – Calidad del Aire

CI4102 Ingeniería Ambiental
Profesora Ana Lucia Prieto

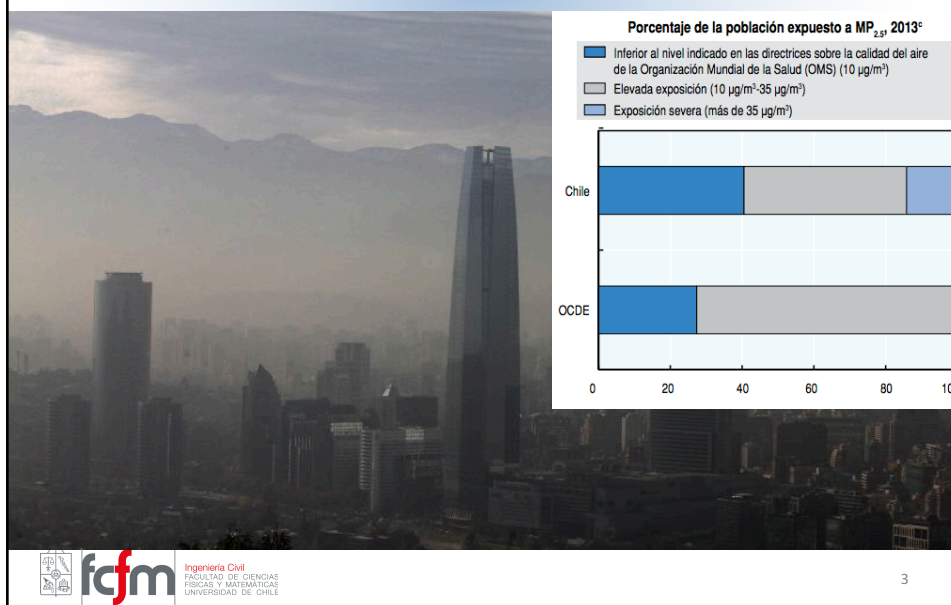


“Most of the world’s population lives in areas where air quality is unhealthy. An estimated 95% of people live in areas where ambient (outdoor) fine particulate matter concentrations (small dust or soot particles in the air) exceed the World Health Organization’s Air Quality Guideline of $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Almost 60% live in areas where fine particulate matter exceeds even the least stringent WHO interim air quality target of $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ”

<https://www.stateofglobalair.org/air>



Calidad del Aire en Chile




Medio Ambiente


SINCA
 Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire

Red de monitoreo en línea
<http://sinca.mma.gob.cl/index.php/redes>

“La Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300, modificada por la Ley N° 20.417/2010, ambas del Ministerio Secretaría Regional de la Presidencia), establece en su artículo 32, la existencia de dos tipos de normas de calidad ambiental: primarias y secundarias. Las **normas de calidad primarias**, son aquellas normas de calidad ambiental que tienen como objetivo proteger la salud de la población humana dentro del territorio nacional; las **normas de calidad secundaria**, tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza y son de carácter local y no necesariamente nacional”

- 1.- Norma de calidad del aire para MP_{2,5} (D.S. N° 12/2010 del Ministerio de Medio Ambiente)
- 2.- Norma de calidad del aire para MP₁₀ (D.S. N° 59/1998, modificado por D.S. N° 45/2001, ambos del Ministerio Secretaría General de la Presidencia)
- 3.- Norma de calidad del aire para SO₂ (D.S. N° 113/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia)
- 4.- Norma de calidad del aire para NO₂ (D.S. N° 114/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia)
- 5.- Norma de calidad del aire para CO (D.S. N° 115/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia)
- 6.- Norma de calidad del aire para Plomo (D.S. N° 136/2000) del Ministerio Secretaría General de la Presidencia)

En lo que respecta a las **normas secundarias de calidad del aire**, las siguientes son las vigentes en nuestro país:

- 1.- Norma de calidad del aire para SO₂ (D.S. N° 22/2009 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia)
- 2.- Norma de calidad del aire para MPS en la cuenca del río Huasco, III Región (D. Exento N° 4/1992 del Ministerio de Agricultura)


fcfm

Ingeniería Civil
 FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
 UNIVERSIDAD DE CHILE

4

<https://aqicn.org/map/world/>

fcfm Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Tabla 5. Normas Primarias de Calidad del Aire⁽¹⁾

Contaminante	Norma	Unidad	Periodo de evaluación
Partículas Totales en Suspensión (PTS)	Derogada		
Material Particulado respirable (PM ₁₀) ⁽²⁾	150	µg/m ³ N	Media aritmética diaria ⁽³⁾
	50	µg/m ³ N	Media aritmética anual de 3 años consecutivos
Dióxido de Azufre (SO ₂)	80	µg/m ³ N	Media aritmética anual de 3 años consecutivos
	250		
Oxidantes fotoquímicos (O ₃)	120		
Monóxido de Carbono (CO)	30		
	10		
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	100		
	400		
Plomo ⁽³⁾	0,5		

⁽¹⁾ Aprobada por Consejo de Ministros de CONAMA.
⁽²⁾ DS 59/1998 y DS 45/2001
⁽³⁾ DS 136/2000
⁽⁴⁾ Percentil 98, ⁽⁵⁾ Percentil 99
 m³N= metro cúbico normal (a 25° C y 1 atmósfera)

Los estándares se revisan y modifican periódicamente.

TABLE 7.1 National Ambient Air Quality Standards and California State Standards

Pollutant	Averaging time	Federal primary	Federal secondary	California	Most relevant effects
Carbon monoxide (CO)	8 hr	9 ppm (10 mg/m ³)	None	9 ppm	Aggravation of angina pectoris; decreased exercise tolerance;
	1 hr	35 ppm (40 mg/m ³)	None	20 ppm	possible risk to fetuses
Nitrogen dioxide (NO ₂)	Annual mean	0.053 ppm (100 µg/m ³)	Same	None	Aggravation of respiratory disease; atmospheric discoloration
	1 hr	None	None	0.25 ppm	Decreased pulmonary function; surrogate for eye irritation; materials and vegetation damage
Ground level ozone (O ₃)	8 hr	0.08 ppm (155 µg/m ³)	Same	0.09 ppm	Wheezing, shortness of breath, chest tightness; plant damage and odor
	Annual mean	0.03 ppm (80 µg/m ³)	None	None	
Sulfur dioxide (SO ₂)	24 hr	0.14 ppm (365 µg/m ³)	None	0.05 ppm	
	3hr	None	0.50 ppm	None	
PM 10	1hr	None	0.25 ppm		
	Annual	50 µg/m ³	Same	30 µg/m ³	Exacerbation of respiratory mean disease symptoms; excess deaths; visibility
PM 2.5 ^a	24 hr	15 µg/m ³	Same	None	
	Annual	65 µg/m ³	Same	None	
Lead (Pb)	1 month	None	None	1.5 µg/m ³	Impaired blood formation; infant development.
	3 months	1.5 µg/m ³	Same	None	

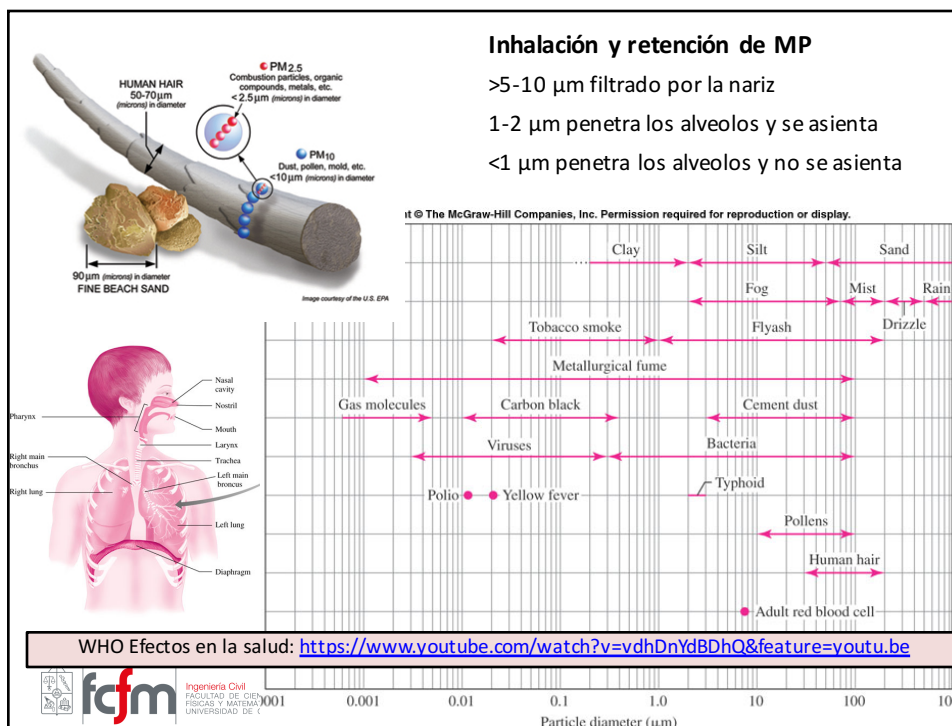
^a added in 1997

fcfm Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

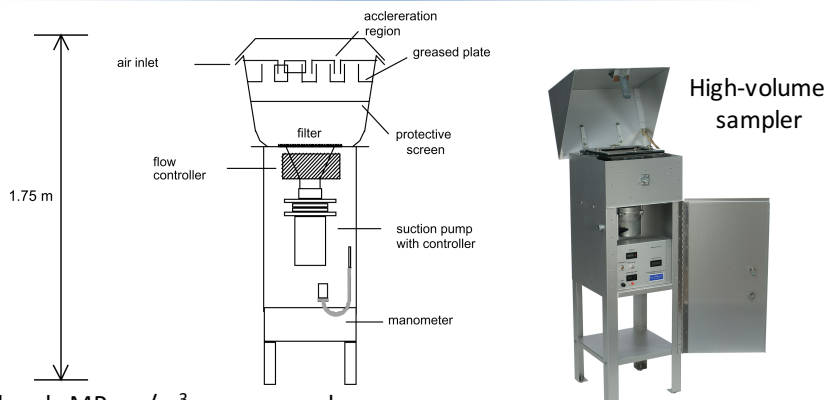
Principales contaminantes del aire: MP

Material Particulado

- Polvo: Partículas sólidas
- *Fumes* o vapores: Partículas sólidas (óxidos metálicos) formados por condensación de vapores por sublimación, destilación, calcinación, o reacciones químicas. Tamaño de 0.03-0.3 micrones.
- Bruma: Partículas líquidas formadas por la condensación un vapor y a veces como producto de una reacción química. (0.5-3 micrones)
- Humo: Partículas sólidas formadas por combustión incompleta de materiales carbonáceos (0.05-1 micrón)
- Spray: Partículas líquidas formadas por la atomización de un líquido precursor.



Sistema de medición de material particulado (MP)



Unidades de MP: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o ppm en volumen

- Los sólidos se miden por diferencia de peso del filtro al inicio y fin de 24 hrs de operación
- Se obtienen los **particulados suspendidos totales (TSP)**
- Actualmente la EPA mide PM10 (<10 μm) en lugar de TSP

Principales contaminantes del aire: GASES

Table 11.1 Some Gaseous Air Pollutants

	Name	Formula	Properties of Importance	Significance as Air Pollutant
SOx	Sulfur dioxide	SO ₂	Colorless gas, intense choking, odor; highly soluble in water—forming sulfurous acid, H ₂ SO ₃	Damage to property, health, and vegetation
	Sulfur trioxide	SO ₃	Soluble in water—forming sulfuric acid H ₂ SO ₄	Highly corrosive
	Hydrogen sulfide	H ₂ S	Rotten egg odor at low concentrations, odorless at high concentrations	Highly poisonous
NOx	Nitrous oxide	N ₂ O	Colorless gas, used as carrier gas in aerosol bottles	Relatively inert; not produced in combustion
	Nitric oxide	NO	Colorless gas	Produced during high-temperature, high-pressure combustion; oxidizes to NO ₂
	Nitrogen dioxide	NO ₂	Brown to orange gas	Major component in the formation of photochemical smog
Compuestos de C	Carbon monoxide	CO	Colorless and odorless	Product of incomplete combustion; poisonous
	Carbon dioxide	CO ₂	Colorless and odorless	Formed during complete combustion; greenhouse gas
	Ozone	O ₃	Highly reactive	Damage to vegetation and property; produced mainly during the formation of photochemical smog
	Hydrocarbons	C _x H _y or HC	Many	Emitted from automobiles and industries; formed in the atmosphere
	Methane	CH ₄	Combustible, odorless	Greenhouse gas
	Chlorofluorocarbons	CFC	Nonreactive, excellent thermal properties	Deplete ozone in upper atmosphere

Gases contaminantes y efectos en la salud

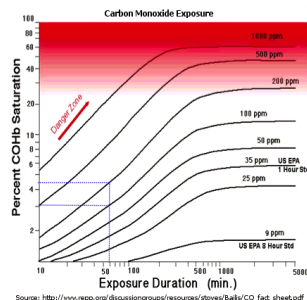
Monóxido de carbono (CO):

- Incoloro, inodoro y letal
- Producto de combustión incompleta
- CO reacciona con la hemoglobina en lugar del O₂
- Deja el organismo una vez que para la exposición

Plomo (Pb):

- Producto de actividad volcánica, suelos, incineración de residuos sólidos, etc.
- Exposición aguda: anemia, fatiga, dolor de cabeza, cólicos, coma, etc.
- Exposición crónica: daño cerebral, debilidad muscular, parálisis.
- Se encuentra particulado en la atmósfera (0.16–0.43 um).

Curva dosis-respuesta para CO
COHb: Carboxihemoglobina

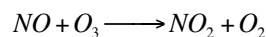
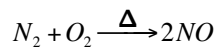


Gases contaminantes y efectos en la salud

Óxidos de nitrógeno (NO_x):

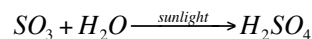
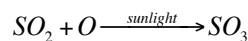
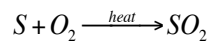
- Producto de combustión incompleta.
- NO reacciona con ozono u oxígeno y forma NO₂
- Causan toz, irritación de los pulmones, y consecuente enfermedad pulmonar.

Combustión en autos



Óxidos de azufre (SO_x):

- Incluyen SO₂, SO₃
- Exposición crónica causa enfermedad pulmonar.
- Producto de la combustión de combustibles fósiles que contengan azufre. Ej: Carbon.



Ozono (O₃):

- Oxidante fotoquímico.
- Causa irritación de mucosas, ojos, vías respiratorias y toz.

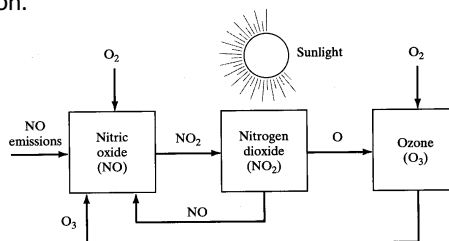
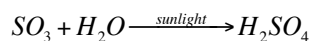
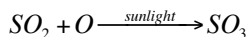
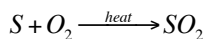
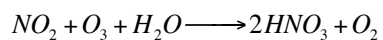
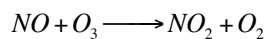
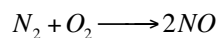


FIGURE 7.7 Simplified atmospheric nitrogen photolytic cycle.

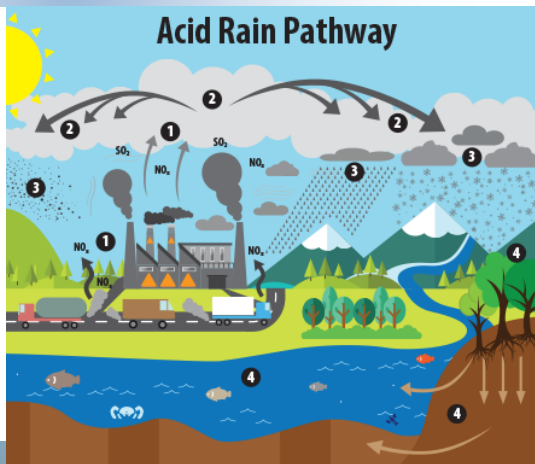
Gases contaminantes y efectos en el ambiente



Ácido sulfúrico



Ácido nítrico



This image illustrates the pathway for acid rain in our environment: (1) Emissions of SO_2 and NO_x are released into the air; where (2) the pollutants are transformed into acid particles that may be transported long distances. (3) These acid particles then fall to the earth as wet and dry deposition (dust, rain, snow, etc.) and (4) may cause harmful effects on soil, forests, streams and lakes.



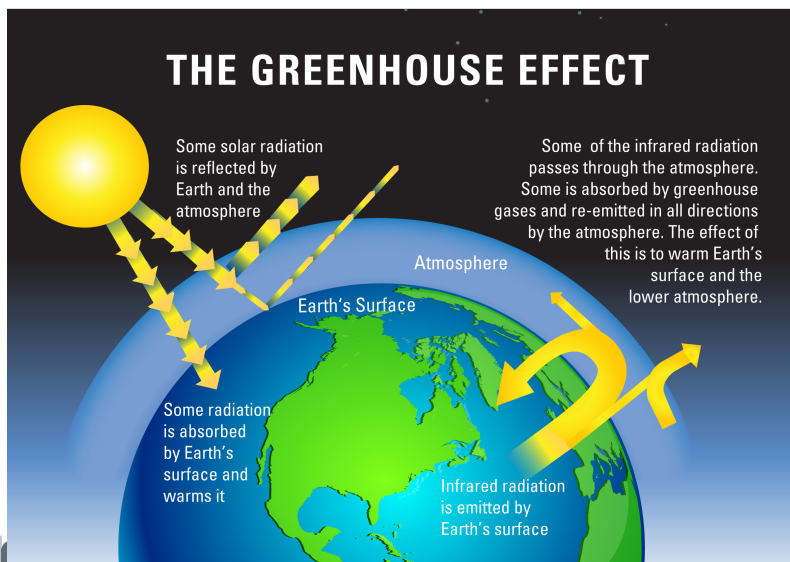
Lluvia normal = pH 5.6

Lluvia ácida = pH 2

13

Efectos globales: El efecto invernadero

La radiación solar entra y es parcialmente atrapada por los gases de efecto invernadero cuando trata de salir

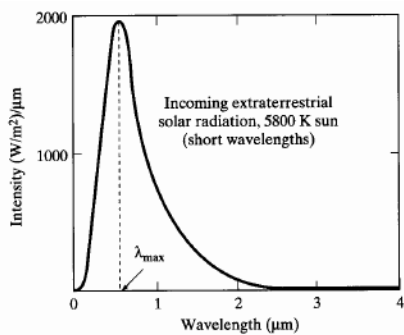


FIGURAS Y MATERIALES UNIVERSIDAD DE CHILE

14

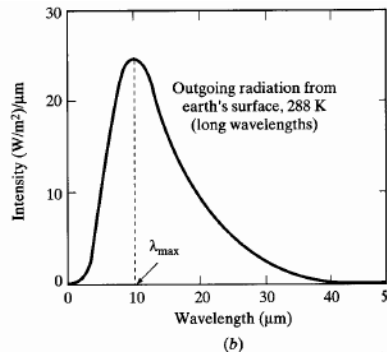
El efecto invernadero

Espectro de energía desde el Sol



Alta frecuencia, longitud de onda corta

Espectro de energía desde la Tierra



Baja frecuencia, longitud de onda larga

THE GREENHOUSE EFFECT

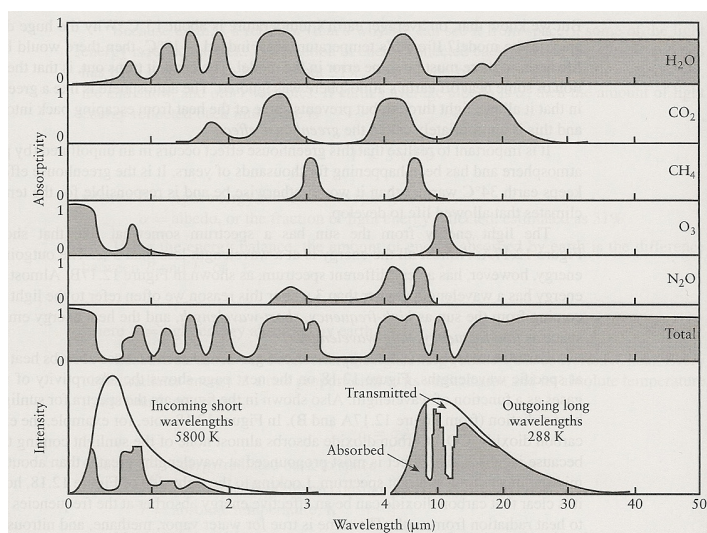
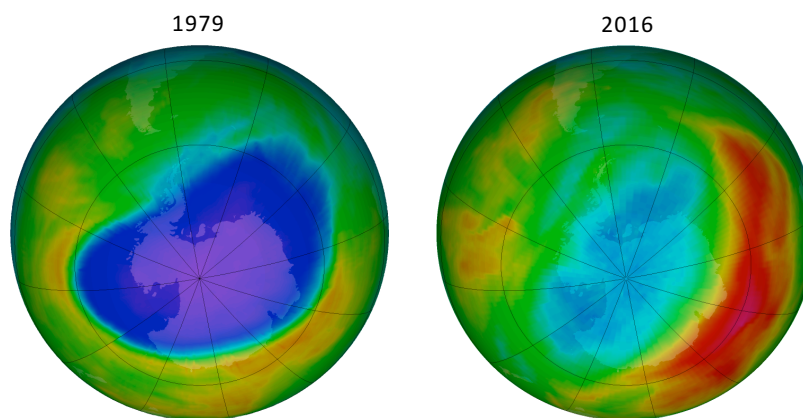


Figure 12.18 Absorptivity as a function of wavelength of various atmospheric gases. At the bottom are the spectra for incoming light energy and outgoing heat energy. The gases are far more efficient at absorbing the outgoing heat energy than in attenuating the incoming light energy. (After Masters, G. 1998. *Introduction to Environmental Engineering and Science*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall. Used with permission.)

Efectos globales: Destrucción de la capa de Ozono



“Thirty years ago, the international community signed the **Montreal Protocol** on Substances that Deplete the Ozone Layer and began regulating ozone-depleting compounds. The ozone hole over Antarctica is expected to gradually become less severe as chlorofluorocarbons—chlorine-containing synthetic compounds once frequently used as refrigerants – continue to decline. Scientists expect the Antarctic ozone hole to recover back to 1980 levels around 2070.” NASA

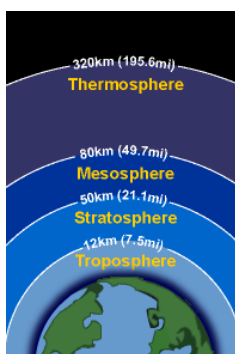


<https://www.nasa.gov/feature/Goddard/2016/antarctic-ozone-hole-attains-moderate-size>
<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/warm-air-helped-make-2017-ozone-hole-smallest-since-1988>

Dispersión de contaminación

Aire puro

- 78.1% Nitrógeno
- 20.9% Oxígeno
- 0.9% Argón
- 0.04% CO₂
- 0.002% Neón
- 0.0005% Helio

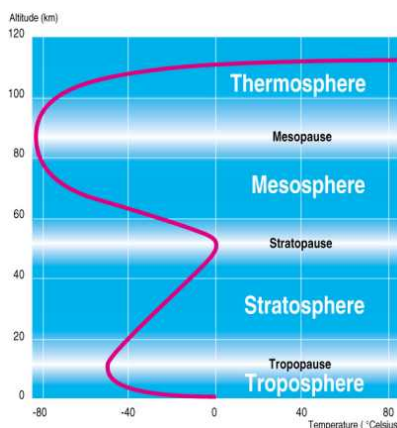


>80% de aire está en la tropósfera

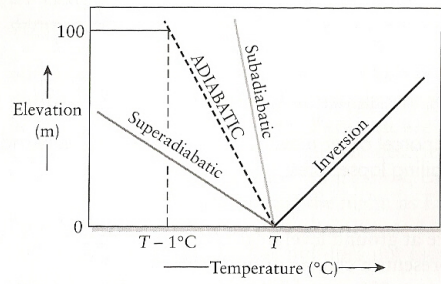
La mayoría de los problemas de contaminación ocurren en la tropósfera

El desgaste de la capa de ozono y el calentamiento global son las excepciones

- El clima ocurre predominantemente en la tropósfera
- El viento es responsable de mover y dispersar los contaminantes
- La extensión del movimiento depende de la **estabilidad atmosférica**



Estabilidad atmosférica y tasas de lapso



Tasa de lapso adiabática seca: 1°C/100 m (Independiente de las temperaturas predominantes en la atmósfera)

El perfil real de temperatura-elevación se denomina **tasas de lapso predominantes**

Superadiabática Cuando la T atmosférica cae más de 1°C cada 100m
Inestable

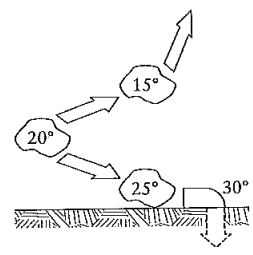
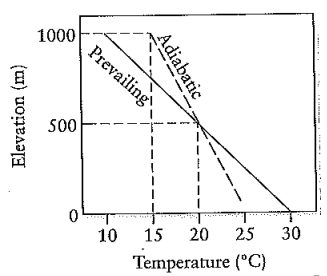
Subadiabática Cuando la T atmosférica cae menos de 1°C cada 100m
Estable



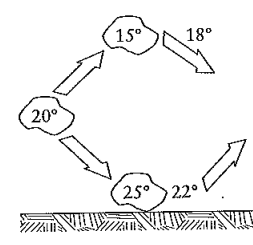
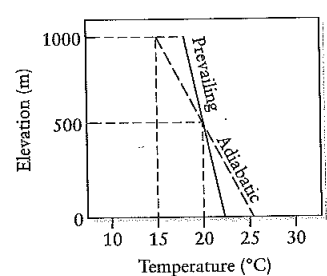
Estabilidad atmosférica y tasas de lapso

Comenzando con un volumen (parcela) de aire a 500 m

Superadiabática
Inestable



Subadiabática
Estable



Dispersión de efluentes

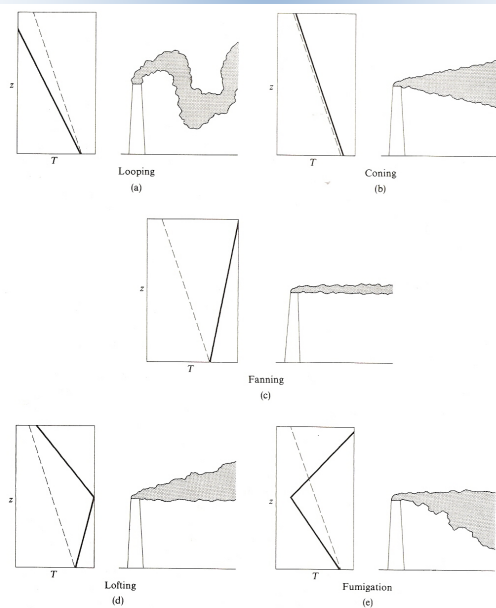
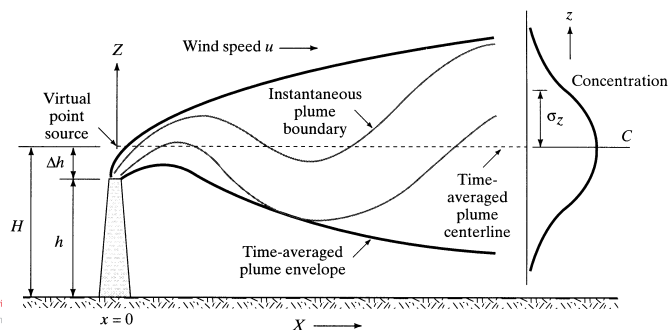


Fig. 7.2 Plume behavior influenced by the lapse rate above and below the release height. The dashed line in the temperature profiles is the adiabatic lapse rate, included for reference.

Dispersión de contaminantes

- Modelos estáticos
 - Concentraciones promedio de largo plazo (asumiendo condiciones promedio estacionarias)
 - Fluctuaciones atmosféricas se pueden representar por parámetros empírico
- Supuestos modelo Gaussiano:
 - Tasa de emisión constante
 - Velocidad del viento constante en tiempo y en la vertical
 - Contaminante conservativo
 - Terreno plano



Cuánto se alza la pluma?

Modelo de Briggs para alzado de la pluma

$$\Delta h = 2.6 \left(\frac{F}{\bar{\mu} S} \right)^{1/3}$$

$$F = \frac{g V_s d^2 (T_s - T_a)}{4(T_a + 273)}$$

$$S = \frac{g}{(T_a + 273)} \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} + 0.01 \right)$$

Δh = altura de alza de la pluma (m)

$\bar{\mu}$ = velocidad promedio del viento (m/s)

F = flujo boyante

S = stability parameter

g = gravedad (9.8 m/s²)

V_s = velocidad del gas saliente (m/s)

d = diámetro de la chimenea

T_a = temperatura atmosférica (°C)

T_s = temperatura del gas (°C)

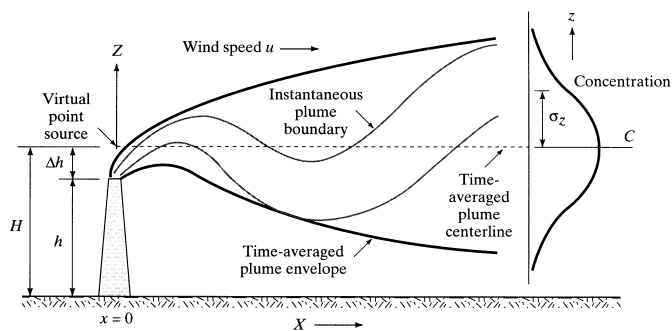
$\Delta T/\Delta z$ = tasa de lapso predominante (°C/m)



23

Cuánto se alza la pluma?

$$\Delta h = 2.6 \left(\frac{F}{\bar{\mu} S} \right)^{1/3} \quad F = \frac{g V_s d^2 (T_s - T_a)}{4(T_a + 273)} \quad S = \frac{g}{(T_a + 273)} \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} + 0.01 \right)$$

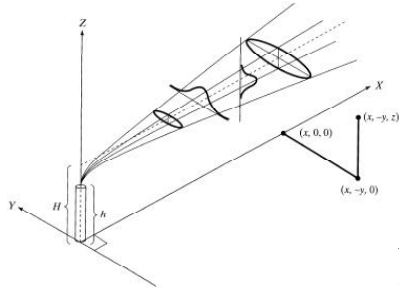


Se asume que la concentración máxima de contaminante se da en la línea central de la pluma



24

Concentración de contaminante



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

$C_{(x,y,z)}$ = conc. En el punto donde se quiere conocer (kg/m³)

Q = tasa de emisión de la fuente (kg/s)

u = velocidad promedio del viento (m/s)

σ = desviación estandar de la dispersión en la dirección y o z

y = distancia horizontal perpendicular al viento (m)

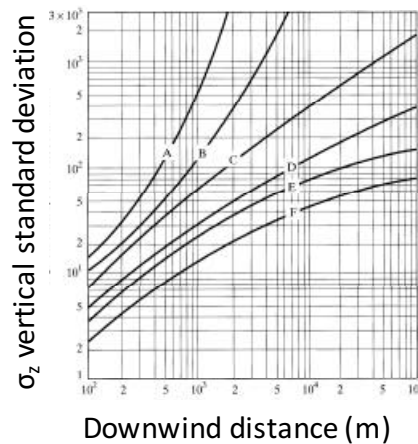
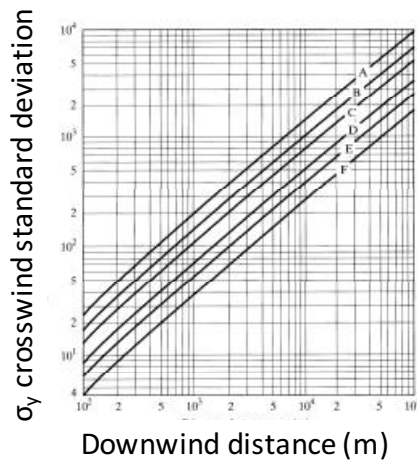
z = distancia vertical

Si las σ son grandes, dispersión alta, concentración baja

Si las σ son pequeñas, dispersión baja, concentración alta

Desviaciones estandar

Clases de estabilidad de Pasquill



Clases de estabilidad

Table 19.1 Stability Classifications*

Surface Wind Speed ^a m/s	Day Incoming Solar Radiation			Night Cloudiness ^e	
	Strong ^b	Moderate ^c	Slight ^d	Cloudy (≥4/8)	Clear (≤3/8)
<2	A	A-B ^f	B	E	F
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

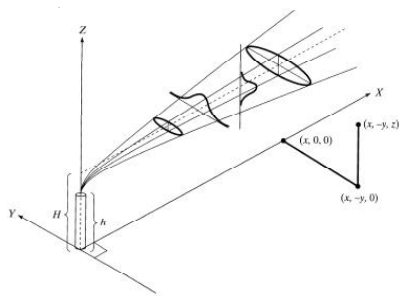
NOTES:

- Surface wind speed is measured at 10 m above the ground.
- Corresponds to clear summer day with sun higher than 60° above the horizon.
- Corresponds to a summer day with a few broken clouds, or a clear day with sun 35-60° above the horizon.
- Corresponds to a fall afternoon, or a cloudy summer day, or clear summer day with the sun 15-35°.
- Cloudiness is defined as the fraction of sky covered by clouds.
- For A-B, B-C, or C-D conditions, average the values obtained for each.

- * A = Very unstable D = Neutral
 B = Moderately unstable E = Slightly stable
 C = Slightly unstable F = Stable
 Regardless of wind speed, Class D should be assumed for overcast conditions, day or night.

Adapted from Turner, 1970.

Concentración de contaminante



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

A nivel de piso, $z = 0$ y conc. máxima ocurre en $y = 0$

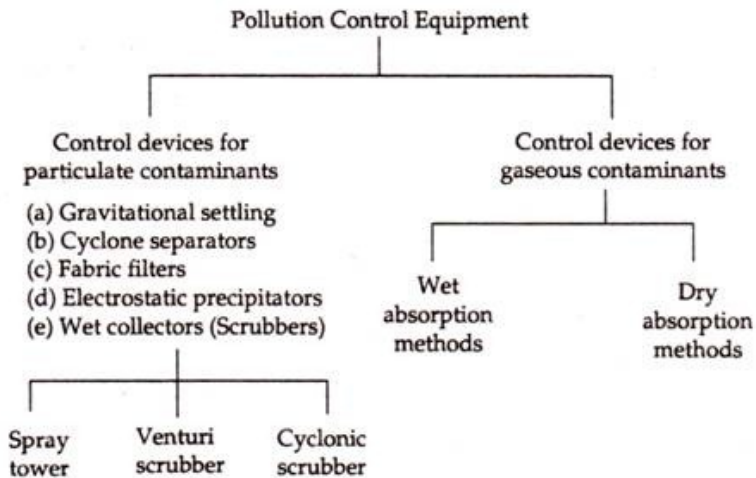
$$C_{(x,0,0)} = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{-H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right)$$

Si se tiene en cuenta el efecto reflectivo del suelo

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

Control de contaminación

Dependiendo del tipo de contaminante:



Control de contaminación - MP



R – recovery (%)
 x_1 – pollutant collected by device per time (Kg/s)
 x_0 – pollutant entering device per time (Kg/s)

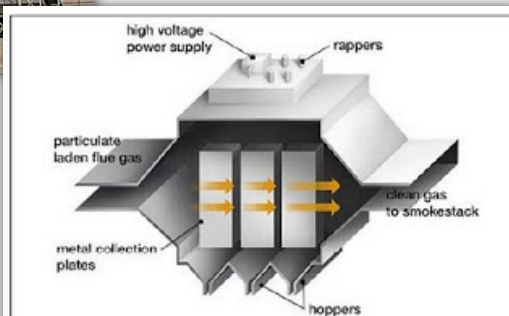


Figure 2.5 Schematic diagram of the side view of an electrostatic precipitator.

(Source: Dayley and Holbert, 2003.)

Control de contaminación - Gases

Filtros de carbon activado

El gas entra en contacto con la antracita o carbon activado

Los contaminantes se atrapan en la superficie



Depuradores húmedos (Wet scrubbers)

Burbujas de gas a través de un líquido para disolverlas

Incineradores

Funciona si los contaminantes son de tipo orgánico

- Oxidación de CO_2 y agua. Ej: CH_4



31

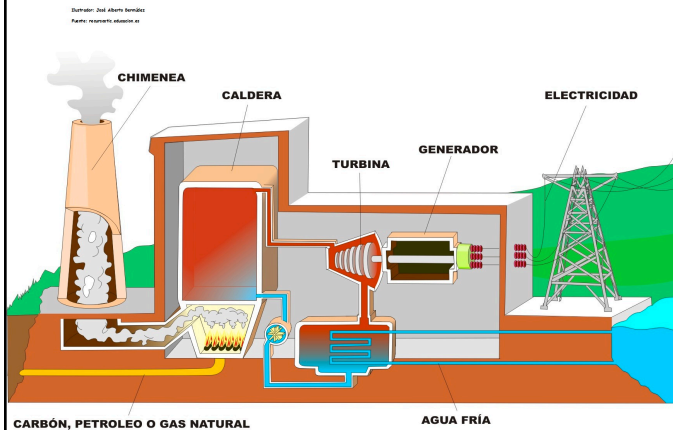
Control de contaminación - Gases

SO_2 y SO_3

- Fuente principal = plantas de generación termoeléctricas (carbón)
- Estándares de emisiones se han vuelto más estrictos con el tiempo



Puchuncaví, Región de Valparaíso



Prevención:

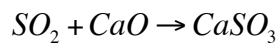
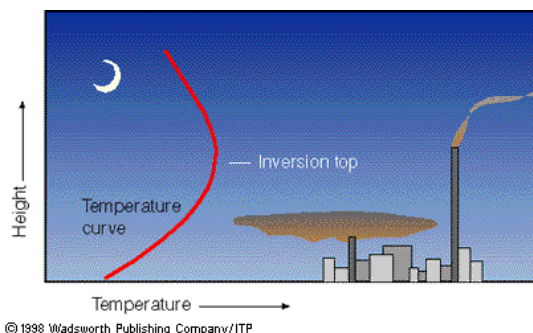
- Uso de combustible bajo en azufre (en comparación al carbón). Ej: gas natural y petróleo (MAS COSTOSOS)
- Desulfurización de carbón
- La opción más económica es gasificar el carbón

32

Control de contaminación - Gases

Control:

- Construcción de chimeneas
- Desulfurización de gases emitidos
- Sistemas regenerativos - Uso de un reactivo para remover SO_x y posteriormente reutilizarlo
- Sistemas no-regenerativos – Uso de un reactivo para remover SO_x para posteriormente descartarlo (METODO MAS COMUN). Se usa soda ash para este propósito

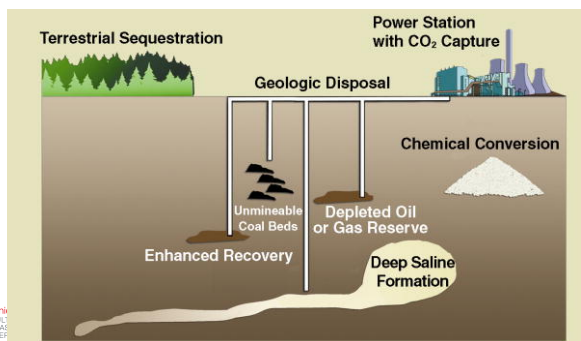


Precipitado peligroso

33

Control de contaminación - Carbono

- Reducción de la demanda y/o cambio de combustible
 - Cambios radicales en política y economía
- Captura y almacenamiento a largo plazo de CO_2 atmosférico
 - Procesos biológicos: $CO_2 + H_2O + \text{luz solar} \rightarrow \text{Biomasa}$
 - Procesos químicos: $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$
 - Procesos físicos: Inyección de CO_2 en reservorios gastados de gas/petróleo o en el océano



34