

1) Escala Sinóptica

En latitudes medias, para movimientos de escala sinóptica se tienen los siguientes valores típicos:

Variable	Símbolo (unidad)	Valor típico
Velocidad horizontal	U (m/s)	10
Velocidad vertical	W (cm/s)	1
Distancia/Largo	L (m)	10^6
Gradiente de presión horizontal	$\Delta P/\rho$ (m^2s^{-2})	10^3
Escala de tiempo	L/U (s)	10^5
Escala de profundidad	H (m)	10^4

Haciendo un análisis de escala y despreciando el efecto de fricción, demuestra que a escala sinóptica, las ecuaciones de movimiento atmosféricas se reducen a un balance geostrófico en la horizontal y un balance hidrostático en la vertical. Explica en qué consisten estos equilibrios.

Lectura recomendada: Holton, J. R., 1979: *An Introduction to Dynamic Meteorology, Second Edition*. Academic Press, New York, 416 pp. (Cap 1 y 2).

2) La fricción y "el llenado" de las bajas presiones

Describe esquemáticamente el efecto que tiene la fricción en la capa límite sobre el balance de fuerzas (viento resultante). ¿Cómo cambia tu resultado si te cambias de hemisferio? Considera por simplicidad isóbaras rectas.

A

B

NB. El efecto de Coriolis es no nulo.

3) Balance hidrostático

a) A partir de la ecuación de balance hidrostático, calcula la presión a nivel del mar si la presión medida a 50 m sobre el nivel del mar es 995 hPa y la temperatura ambiente es 0°C. Supón que la temperatura varía en altura con 0.5°/100m.

b) En lo que se llama una atmósfera homogénea, la densidad no varía con la altura. ¿Cuál sería la profundidad de una atmósfera homogénea si la presión a nivel del suelo fuera 1013 hPa y la temperatura a nivel del suelo 0°C. Supón que esta atmósfera está en balance hidrostático.

c) Deriva una expresión para la presión (p) como función de la altura sobre el suelo (z).

4) Escala de altura

Se define la escala de altura (“scale height”) como el tramo de altura H en que la presión disminuye en un factor $1/e$. ¿Cómo depende H de la aceleración de gravedad, la composición atmosférica y la temperatura? Calcula H para los casos siguientes:

- La atmósfera tiene la misma composición que la terrestre y con una temperatura de -60°C (como en la estratósfera). En este caso $g=9.8\text{ m/s}^2$
- La atmósfera está compuesta mayoritariamente de dióxido de carbono con una temperatura de 400°C (como en Venus). En este caso $g=8.7\text{ m/s}^2$

5) Transformación de unidades

En un lugar del hemisferio norte se midió la razón de mezcla en volumen de dióxido de carbono (CO_2) en 360 ppmv^* . La temperatura era de 15°C y la presión reinante de 1013.2 hPa . Expresa esta razón de mezcla como:

- razón de mezcla en masa
- razón molar
- concentración en masa
- concentración en moles

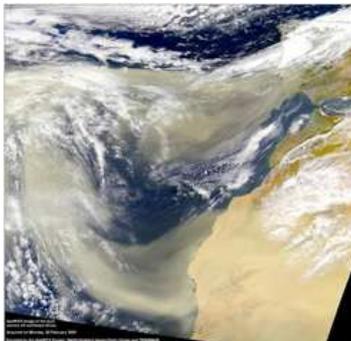
¿Cambiarían estos cálculos si las mediciones hubieran sido realizadas en el hemisferio sur?

Lectura recomendada:

Seinfeld, J. y Pandis, S., 1998. Atmospheric Chemistry and Physics. From Air pollution to climate change, J. Wiley and Sons, Inc.

6) Transporte intercontinental de partículas

En la isla de Barbados se observan regularmente partículas originadas en el desierto de Sahara (aproximadamente a 5000 km de distancia). Sobre la base de aproximaciones cinemáticas simples, estima cuáles partículas tienen una “chance razonable” de ser transportadas hasta Barbados. Supón que sobre el Atlántico no ocurre mezcla vertical del aire ni hay precipitaciones. La velocidad de transporte sobre el Atlántico (alisios) es del orden de 10 m/s . La tabla siguiente indica las velocidades de sedimentación de partículas de densidad de 1 g/cm^3 .



* ppm, ppb, ppt indican “parts per” “million” (10^{-6}), “billion” (10^{-9}), o “trillion” (10^{-12}). Debe indicarse si se trata de razón en masa o en volumen (ppmm vs ppmv).

Radio de la partícula (μm)	Velocidad de sedimentación (cm/s)
0.5	0.004
1	0.013
2	0.050
5	0.32
10	1.2
20	5.0

Lecturas sugeridas:

Prospero, J. and Savoie, D., 1989: Effect of continental sources on nitrate concentrations over the Pacific ocean, *Nature* 339, 687-689.

Stohl, A. And Tickl, T., 2001: Experimental evidence for trans-Atlantic transport of air pollution. IGAC_activities Newsletter
(http://www.igac.noaa.gov/newsletter/igac24/Aug_2001_IGAC_24.pdf)

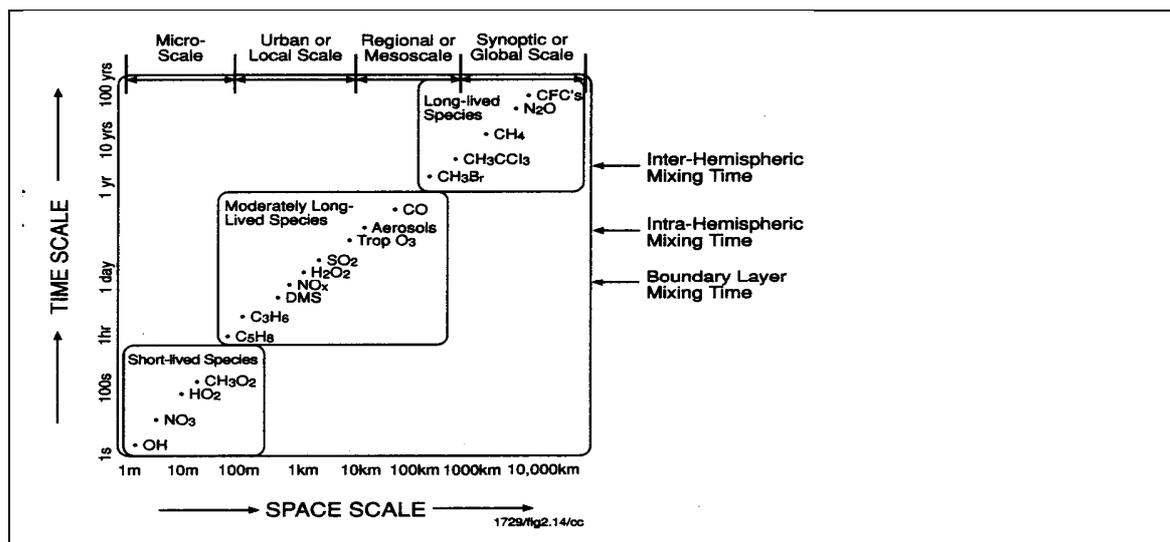
7) Tiempo de recambio y alcance de la dispersión

Se estima que el tiempo de recambio de:

- el metano (CH_4) es de aproximadamente 10 años
- el monóxido de carbono (CO) es de aproximadamente 1 mes
- el dióxido de azufre (SO_2) es aproximadamente 3 días
- las partículas “gruesas” es de $\frac{1}{2}$ hora

¿Qué puede decirse acerca de la extensión sobre la cual estos compuestos son dispersados? Justifica tu respuesta.

Considera:



Fuente: Brasseur, G. P. , a. B. Khattatov, and S. Walters, 1999: Modeling, in *Atmospheric Chemistry and Global Change*, edited by G. Brasseur, a. J. Orlando, and G. Tyndall, Oxford University Press, Oxford.

8) El compuesto de azufre más abundante de la atmósfera

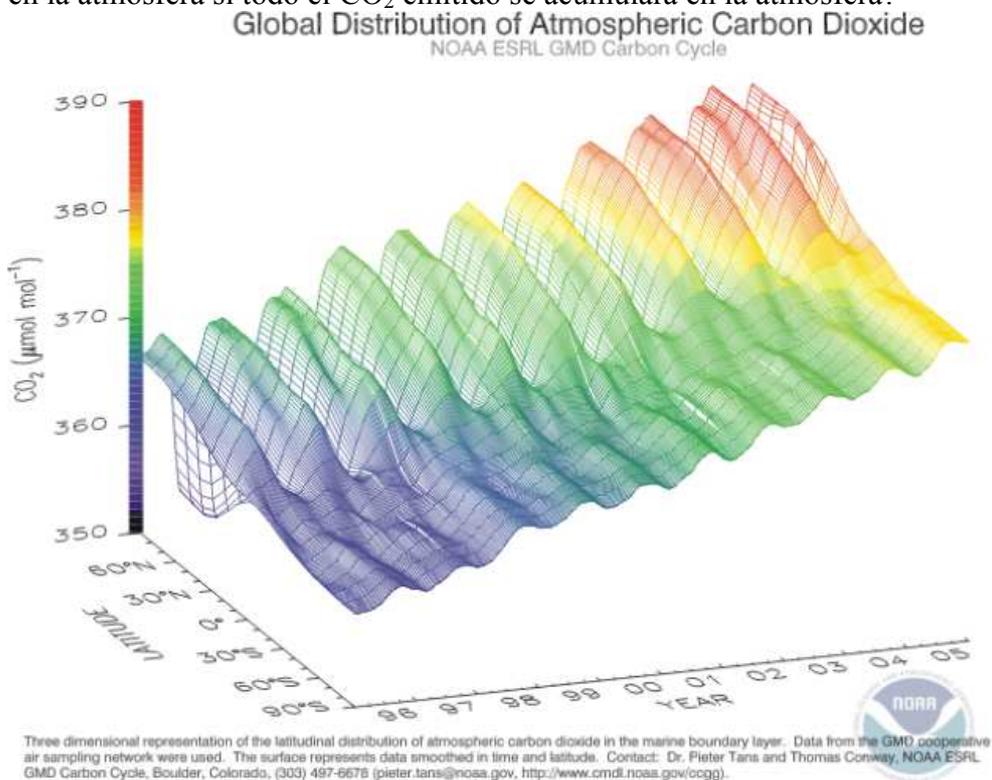
La razón de mezcla en volumen del oxisulfuro de carbono (OCS) en la atmósfera es en promedio 500 pptv. Estima su tiempo de recambio en la atmósfera si se producen anualmente 1.2 Tg^{**} , contados como azufre (S), y se puede suponer que hay equilibrio entre fuentes y sumideros. Considerando el tiempo de recambio estimado, ¿cuán acertado es suponer que el OCS está perfectamente mezclado en la atmósfera?; ¿esperarías medir variaciones interhemisféricas?

Lectura:

Kjellström, E., 1998: A three-dimensional global model study of carbonyl sulfide in the troposphere and the lower stratosphere. *J. Atmos. Chem.*, 29, 151-172

9) Acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera

La emisión anual de dióxido de carbono (CO_2) por quema de combustibles fósiles es aproximadamente 7 PgC^1 . ¿Cuál sería el aumento anual en la razón de mezcla de CO_2 en la atmósfera si todo el CO_2 emitido se acumulara en la atmósfera?



Lectura recomendada (unidades y cambio de unidades):

Seinfeld, J. y Pandis, S., 1998. Atmospheric Chemistry and Physics. From Air pollution to climate change, J. Wiley and Sons, Inc.

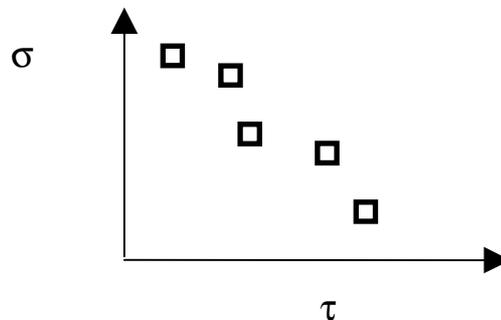
Ver también:

<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/trends/> ; <http://www.ipcc.ch/> IPCC report 2007

** $\text{Tg} = 10^{12} \text{ g}$; $\text{Pg} = 10^{15} \text{ g}$
1 $\text{Pg} = 10^{15} \text{ g}$

10) Tiempo de recambio y ciclos biogeoquímicos

a) Junge publicó en 1974 resultados experimentales que mostraban que el tiempo de residencia atmosférico (τ) de varias sustancias era inversamente proporcional a la variabilidad espacial de sus concentraciones (σ). Interpreta los resultados de Junge (Ver bosquejo).



b) El 99.99% de la masa del reservorio atmosférico de nitrógeno (3.9×10^9 TgN) se encuentra en la forma de nitrógeno molecular (N_2). La fijación biológica de nitrógeno constituye el principal sumidero de N_2 atmosférico con un flujo de aproximadamente 190 TgN/año. Sin embargo, la fijación de origen antrópico es un flujo no despreciable correspondiente a alrededor de 40 TgN/año. ¿En cuánto se ha reducido el tiempo de recambio del N_2 atmosférico respecto del sumidero de fijación por efecto de la perturbación antrópica?

Lecturas sugeridas:

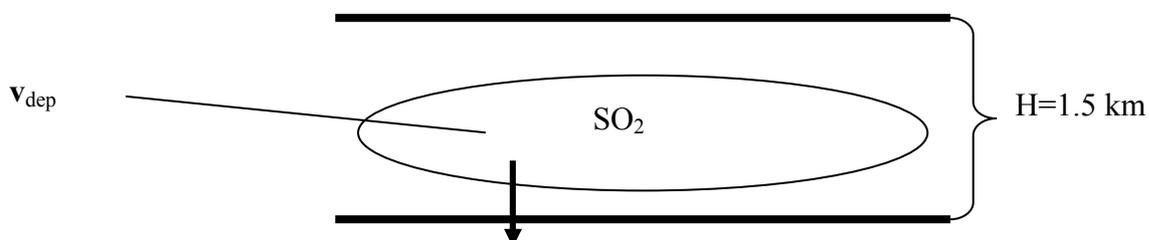
Junge, C., 1974: Residence time and variability of tropospheric trace gases. *Tellus* 24, 477-488.

Ver también:

http://www.ametsoc.org/atmospolicy/documents/JamesGalloway_Nitrogen_March_21_2006.pdf

11) Tiempo característico de remoción seca de dióxido de azufre (SO_2)

Una capa de aire bien mezclada entre el suelo y una altura H de 1.5 km contiene 5 ppbv de dióxido de azufre (SO_2). ¿Cuánto tiempo tomaría sacar 4 ppbv de SO_2 si el único sumidero fuera el proceso de deposición seca? Este último proceso se caracteriza en este caso por una velocidad de deposición de 0.5 cm/s. Se puede suponer que la capa de aire no se mezcla con el aire por sobre los 1.5 km.



Indicación: Considera un pilar de aire sobre 1 m^2 y parte del balance:

$$\frac{dM}{dt} = Q - S$$

donde:

M: contenido o masa
Q: fuentes (flujo)
S: sumideros (flujos)

12) Dispersión y circulación en dos ciudades

a) Describe al menos un par de circulaciones atmosféricas que afecten la dispersión de contaminantes en la ciudad de Temuco. Discute esquemáticamente cómo cambian los vientos, temperaturas en superficie y nubosidad a través del año.

b) La industria pesquera que se desarrolla en torno al puerto de Talcahuano da lugar, a veces, a un grave problema de olores durante los meses de verano. Estos olores se deben a la descomposición de pescados en las bodegas de los barcos estacionados en las costas y en las bodegas en las instalaciones portuarias e industriales ubicadas en la costa. Con lo que tú sabes sobre circulaciones atmosféricas de mesoescala, intenta dar una explicación al hecho que las mayores molestias en la población (nauseas, vómitos, etc.) se acusen durante el día y no durante la noche.

13) Ozono troposférico: la perspectiva global

La figura muestra una climatología (1979-2000) de datos de ozono troposférico inferidos a partir de observaciones satelitales (Ver: <http://asd-www.larc.nasa.gov/TOR/data.html>). Allí se indica el espesor de la columna de ozono troposférico en unidades Dobson (1 DU=2.687x10¹⁶ moléculas/cm² o la altura en milímetros que tendría la columna de ozono si se la comprimiera a una atmósfera y 0°C).

- a) ¿Qué procesos prevalecen viento debajo de África en la primavera austral?
- b) ¿A qué se debe el mínimo relativo observado en el Pacífico Ecuatorial?
- c) ¿Es visible en esta figura el efecto de megaciudades?

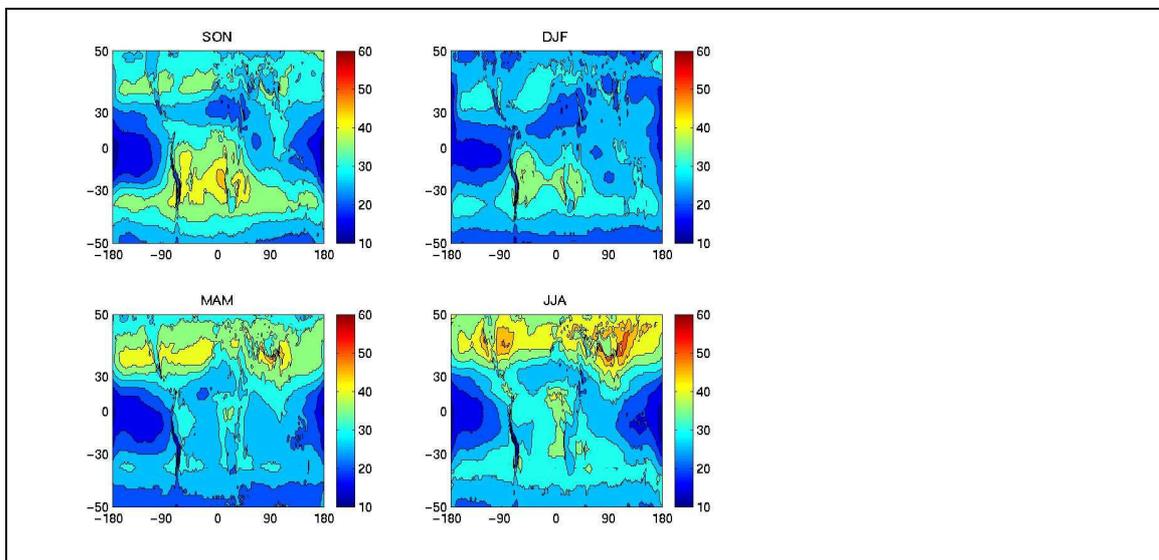


Figura. Columna de ozono troposférico según Fishman et al (2002) y datos publicados en <http://asd-www.larc.nasa.gov/TOR/data.html>. Fishman, J., J.K. Creilson, A.E. Balok, and F.M. Vukovich, 2002: Two decades of tropospheric ozone observations from satellite measurements, the use of these data in models, and some insight into future capabilities, presented at 7th Scientific Conference of the International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Project, Crete, Greece, September 2002.

14) Emisiones volcánicas

- ¿Cuáles son las especies emitidas desde los volcanes? (Distingue entre procesos eruptivos y fumarólicos)
- ¿Cuáles volcanes chilenos se encuentran caracterizados en términos de sus emisiones de azufre oxidado?
- ¿Cómo se comparan dichas emisiones con las provenientes de la gran minería del cobre actualmente?, ¿cómo era dicha comparación hace 10 o 15 años?

Lecturas recomendadas:

Mather, T. A., V. I. Tsanev, D. M. Pyle, A. J. S. McGonigle, C. Oppenheimer, and A. G. Allen (2004), Characterization and evolution of tropospheric plumes from Lascar and Villarrica volcanoes, Chile, *J. Geophys. Res.*, 109, D21303, doi:10.1029/2004JD004934.

Textor, C., H.-F. Graf, C. Timmreck, and A. Robock: Emissions from volcanoes, in C. Granier, P. Artaxo, C. E. Reeves (eds.), *Emissions of Atmospheric Trace Compounds, Advances in Global Change Research*, 18, pp. 269-303, 2004.

15) Inventarios de emisiones

Describe los tipos de fuentes que forman parte de un inventario de emisiones y mencione ejemplos de las incertidumbres que pueden aparecer en cada una de ellas.

Lecturas sugeridas:

- European Environmental Agency. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007 (<http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR5/en/page002.html>)

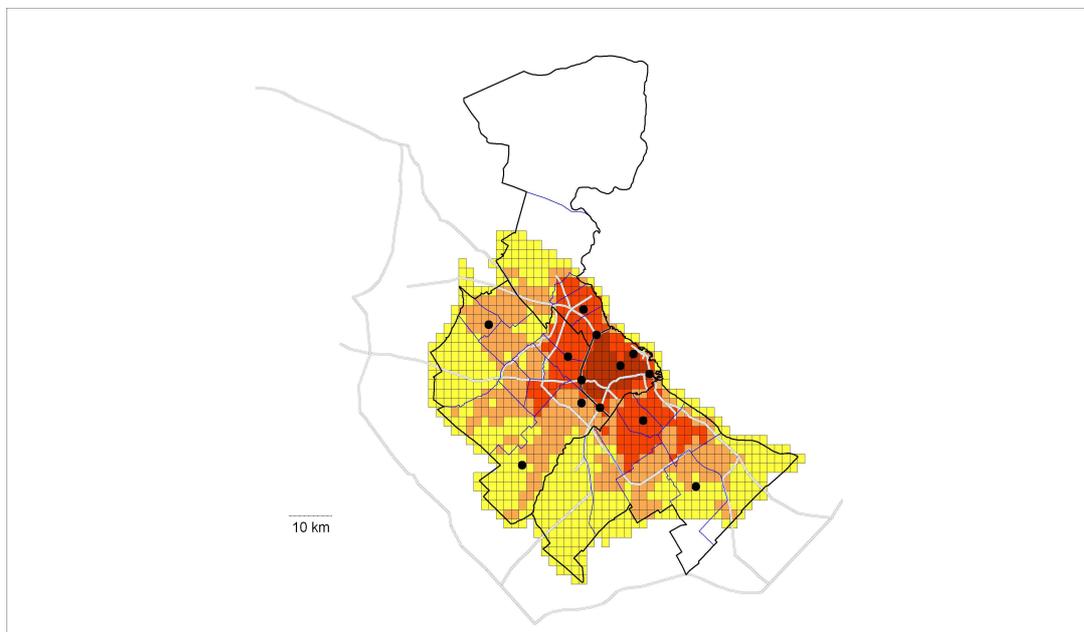


Imagen del inventario de emisiones de monóxido de carbono (fuentes móviles) de Buenos Aires. Gentileza de Ariela D'Angiola y colegas (Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina).

16) Potencia Específica

Describe la metodología de Potencia Especifica Vehicular utilizada para la estimación de emisiones vehiculares.

Lectura sugerida:

Zhai et al (2008). A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. Environ. Sci. Technol., 2008, 42 (21), 7985-7991 • DOI: 10.1021/es800208d

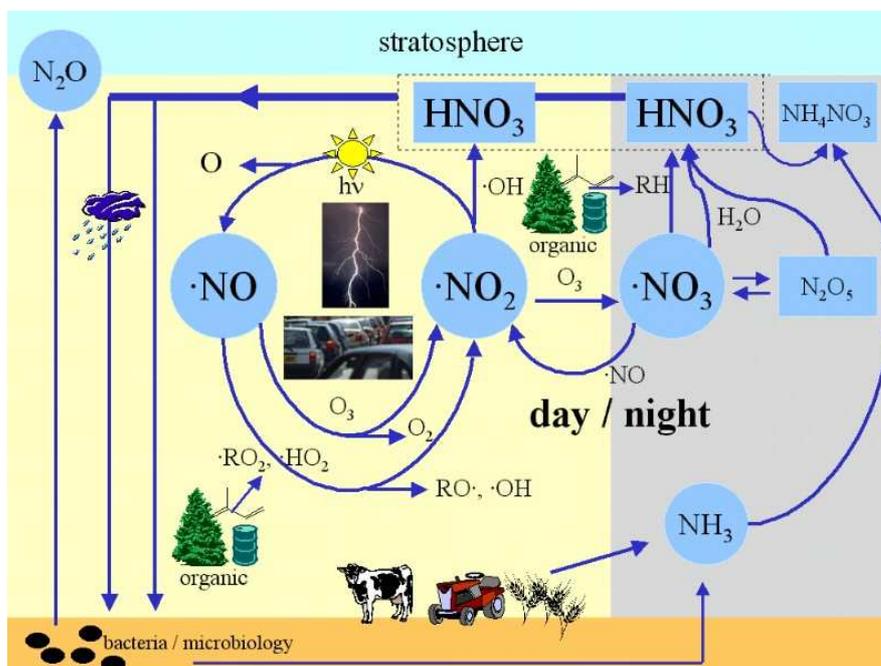


17) Emisiones de óxidos de nitrógeno

Describe bajo qué procesos se producen los óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), cuáles son las condiciones que provocan su formación y cómo participan en la formación de ozono.

Lecturas sugeridas:

- <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/23b.html>



- **Fachini, F. 2007.** Extended Shvab-Zel'dovich formulation for multicomponent-fuel diffusion flames. International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 50, Issues 5-6, March 2007, Pages 1035-1048

<p>Nota especial</p> 	<p><i>Zel'dovich propuso en su tesis doctoral (1939) un mecanismo a través del cual se formaría monóxido de nitrógeno en conjunción con procesos de alta temperatura (> ~1000 C) y expansión de ondas de choque. Este mecanismo es la base de los cálculos teóricos que estiman la emisión de NO en conexión con procesos de alta temperatura tales como combustión, explosiones nucleares y de descargas eléctricas.</i></p> <p>Ya.B.Zeldovich, Yu.P.Raizer, Physics of Shock waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena. N.Y.: Academic Press, 1966.</p>
<p>Yakov B. Zel'dovich (1914-1987)</p>	

18) Ecuación de continuidad en un modelo de dispersión global MOGUNTIA (Zimmermann, 1988*).

A partir de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial(\rho\mu)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mu\mathbf{v}) = Q - S \quad (*)$$

donde:

$\partial/\partial t$: indica la variación local respecto del tiempo

∇ : indica la variación respecto del espacio (tres direcciones independientes)

ρ : densidad del aire (g/m^3)

μ : razón de mezcla en masa (g/g)

\mathbf{v} : vector tridimensional de viento (m/s)

Q: fuentes ($\text{g/m}^3 \text{ s}$)

S: sumideros ($\text{g/m}^3 \text{ s}$)

y:

- definiendo los promedios:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau x \, dt$$

$$[x] = \frac{\langle \rho x \rangle}{\langle \rho \rangle}$$

- considerando las particiones (llamadas de Reynolds):

$$\rho = \langle \rho \rangle + \rho'$$

$$\mu = [\mu] + \mu''$$

$$\mathbf{v} = [\mathbf{v}] + \mathbf{v}''$$

* Zimmermann, P., 1988: MOGUNTIA: A handy global tracer model. In "Air pollution modeling and its applications" (van Dop, ed.), Volume VI Plenum, New York.

donde las primas ' indican perturbaciones en torno al promedio.

- usando la ecuación de conservación de masa del aire expresada como:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- introduciendo el “tensor de difusión” según:

$$[\mu'' \mathbf{v}'] = -K_{ij} \frac{\partial[\mu]}{\partial x_j} = -\vec{K} \cdot \nabla \mu$$

demuestra que la ecuación de continuidad para cualquier sustancia (*) se puede escribir como:

$$\langle \rho \rangle \frac{\partial([\mu])}{\partial t} = -\langle \rho \rangle [\mathbf{v}] \cdot \nabla[\mu] + \nabla \cdot (\langle \rho \rangle \vec{K} \cdot \nabla[\mu]) + \langle Q \rangle - \langle S \rangle \quad (**)$$

Discute el significado de cada uno de los términos de la ecuación (**).

Visita sugerida: <http://www.moguntia-global-modelling.de/>

19) Ecuación de continuidad en modelos usados en Chile

- A partir de Robertson et al (1999) y lo que tú conoces de modelos de dispersión, indica cómo se representa la ecuación de continuidad o de conservación de masa en este modelo. (Robertson, L., Langner, J., and Engardt, M. 1999. An Eulerian limited-area atmospheric transport model. *J. Appl. Met.* 38, 190-210.)
- Busca información sobre algún otro modelo de dispersión (ver tabla adjunta) y discute en qué se diferencia la representación de la ecuación de continuidad en dicho modelo.

Sigla	www	Referencias	Contacto en Chile
POLYPHEM US/ POLAIR	http://www.enpc.fr/cerea/polyphemus/	V. Mallet and B. Sportisse. 3-d chemistry-transport model Polair3D: numerical issues, validation and automatic-differentiation strategy. <i>Atmos. Chem. Phys. Disc.</i> , (1):1371:1392, 2004.	Ricardo Alcaful ricardo@meteochile.cl
CMAQ/ CAMx	http://www.epa.gov/asmdnerl/CMAQ/ http://www.camx.com/	http://www.epa.gov/asmdnerl/CMAQ/CMAQscienceDoc.html	<ul style="list-style-type: none"> • Luis Díaz, Universidad Católica de Temuco, ldiaz@uct.cl • Héctor Jorquera, U. Católica Santiago, jorquera@puc.cl • Pedro Sanhueza, Universidad de Santiago, psanhuez@usach.cl
WRF	http://www.wrf-model.org/index.php	Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2 (http://www.wrf-model.org/wrfadmin/publication_s.php)	Rainer Schmitz schmitzr@dgf.uchile.cl

20) Un modelo simple de azufre oxidado

Un modelo simple de transporte de contaminantes describe la concentración de dióxido de azufre (SO₂) y sulfato (SO₄) según:

$$\frac{dC_1}{dt} = (1 - \alpha - \beta) \frac{Q}{D} - \left(\frac{v_1}{D} + k_t + k_{w1} \right) C_1 \qquad \frac{dC_2}{dt} = \beta \frac{Q}{D} + k_t C_1 - \left(\frac{v_2}{D} + k_{w2} \right) C_2$$

donde:

C₁: concentración de SO₂-S (expresado como azufre S) en gS/m³

C₂: concentración de SO₄-S (expresado como azufre S) en gS/m³

Q: emisión de SO₂-S en gS/m² s

α=0.15: deposición local de SO₂-S dentro de los primeros 100 km de trayecto

β=0.05: fracción de la emisión que ocurre como SO₄-S

D= 1km: altura de la capa de mezcla

k_t=3.0 10⁻⁶ s⁻¹ coeficiente de transformación de SO₂ a SO₄

k_{w1}, k_{w2}: coeficientes de deposición húmeda de SO₂ y SO₄

v₁= 0.8 cm/s : velocidad de deposición de SO₂-S

v₂= 0.1 cm/s : velocidad de deposición de SO₄-S

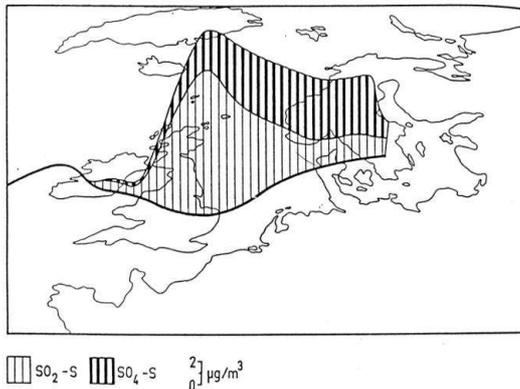


Figura La figura muestra la evolución de un penacho de azufre oxidado emitido en Gran Bretaña hasta su llegada a Escandinavia (Adaptado de Rodhe, 1991).

Las ecuaciones anteriores describen las derivadas temporales individuales (totales) y describen las transformaciones en el tiempo que ocurren en las burbujas de aire que siguen trayectorias en la capa límite.

Estima la concentración de SO₂-S y SO₄-S en la costa occidental sueca cuando el azufre emitido en Inglaterra es transportado según este modelo (¿En qué tipo de referente está expresado este modelo?).

Supón que las emisiones en Inglaterra determinan una concentración inicial en el paquete de aire que es transportado de 30 μg SO₂/m³ y 10 μg SO₄/m³. Considera también que el tiempo de transporte entre Inglaterra y la costa sueca es de 20 horas y que no llueve en el trayecto. Durante dicho trayecto no hay emisiones.

Para más detalle ver (Lectura sugerida):

Eliassen, A., Hov, Ø., Isaksen, I., Saltbones, J. and Stordal, F., 1982: A Lagrangian long-range transport model with atmospheric boundary layer chemistry. *J. Appl. Met.*, 21, 1645-1661.

21) El efecto de la solubilidad

- a) Compara los flujos de deposición seca y húmeda del ozono sobre un área de Europa bajo las siguientes consideraciones:
- la razón de mezcla del ozono cerca de la superficie es 35 ppbv
 - la velocidad de deposición se estima en 0.8 cm/s
 - la razón entre la concentración de ozono en el agua de lluvia y la concentración a nivel de superficie (“wash out ratio”) es 0.33
 - la precipitación anual se estima en 650 mm
- b) Calcula el tiempo de recambio del ozono en la capa atmosférica entre 0 y 10 km si la razón de mezcla promedio en la capa es 40 ppbv y los únicos sumideros son los estimados en a). Se puede suponer que 9/10 de la masa atmosférica están en la capa entre 0 y 10 km de altura.

NB. “Wash out ratio”: se define como la razón entre la concentración en la precipitación y la concentración en el aire cerca del suelo. Si este parámetro es conocido, entonces, el flujo de deposición húmeda (F) queda dado por:

$$F = c_p P = w c P$$

donde P es la precipitación, c_p la concentración en masa en el agua de lluvia, w el coeficiente de lavado y c la concentración en masa medida en el aire.

22) Dispersión atmosférica, tiempos de recambio y procesos de deposición.

Un grupo de ciudadanos considera que la autoridad ambiental ha cometido un error al determinar que toda la Región Metropolitana de Santiago está afectada por un problema de contaminación por material particulado respirable (Partículas de radio aerodinámico inferior a 10 μm , PM_{10}). Estos ciudadanos argumentan que el impacto de las fuentes antrópicas de material particulado no puede ir más allá de unos pocos kilómetros a la redonda de dichas fuentes. La autoridad sostiene que hay fundamentos teóricos y empíricos que avalan su decisión. Se pide tu asesoría en este tema para hacer explícitos los argumentos teóricos que, en efecto, justifican la decisión de la autoridad ambiental. ¿Cuáles son esos argumentos? También, se requiere que hagas algunas estimaciones preliminares respecto del área de influencia de las fuentes para condiciones invernales y estivales típicas. Para ello cuentas con los siguientes datos:

- Santiago está ubicado en una latitud subtropical. Por lo tanto su clima es de tipo mediterráneo con veranos secos e inviernos lluviosos.
- La velocidad de deposición para PM_{10} se estima en aproximadamente 0.5 cm/s
- La altura de capa de mezcla invernal es alrededor de 500 m y la estival de 1000 m
- En invierno llueve, aproximadamente, cada 5 días. Se puede suponer que las partículas son eficientemente removidas por la lluvia.
- La intensidad del viento cerca de la superficie (donde están las fuentes) es típicamente 3 m/s

Discute las limitaciones de tus estimaciones.

El tiempo de recambio con respecto a la deposición húmeda puede aproximarse según:

$$\tau \approx T_d + \frac{1}{f\lambda}$$

donde T_d es el tiempo que transcurre entre los eventos de lluvia (períodos secos), f es la fracción del tiempo en que precipita y λ el coeficiente de lavado (“scavenging”). Así

para sustancias que son eficazmente removidas por deposición húmeda, el tiempo de recambio queda dado por T_d



23) Coeficientes de remoción húmeda (“scavenging”)

- Calcular el coeficiente de remoción húmeda (λ) de aerosoles en función del tamaño de partículas en el rango 0.01 a 0.1 μm , caracterizadas por un diámetro d , considerando gotas de diámetro $D=5\text{mm}$ que caen con velocidad terminal correspondiente a 25 $^{\circ}\text{C}$.
- Calcular el coeficiente de remoción húmeda (λ) del amonio gaseoso (NH_3), considerando una distribución de tamaños de gotas de lluvia de Marshall y Palmer (1948) e intensidades de lluvia de 1, 10 y 20 mm/h. Suponer que el diámetro mínimo de las gotas es 0.02 cm.

De acuerdo a Marshall y Palmer (1948):

$$n(D_p) = 0.08 \exp(-41 D_p P_o^{-0.21})$$

donde D_p es el diámetro de las gotas y P_o es la precipitación en superficie.

Lectura recomendada:

Marshall, J. S., and Palmer, M. W., M (1948). The distribution of raindrops with size. J. Meteorol., 5, 165-166 ([http://ams.allenpress.com/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1175%2F1520-0469\(1948\)005%3C0165%3ATDORWS%3E2.0.CO%3B2](http://ams.allenpress.com/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1175%2F1520-0469(1948)005%3C0165%3ATDORWS%3E2.0.CO%3B2))

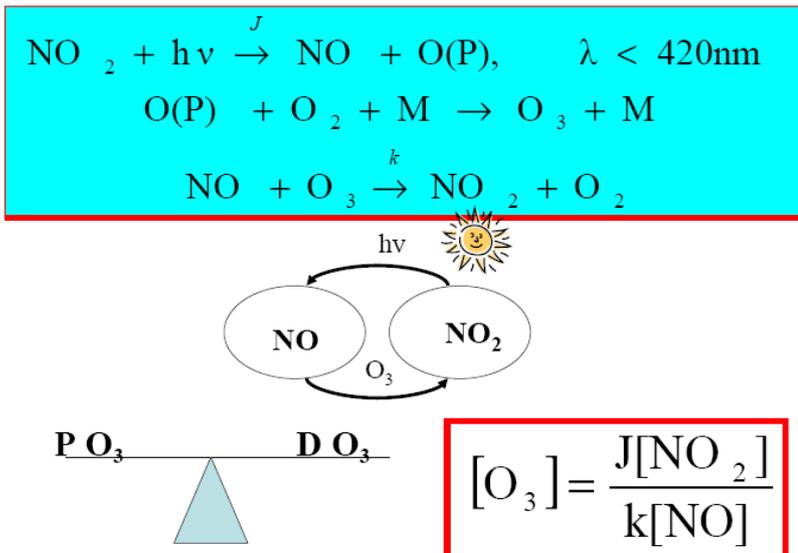
24) Tratamiento de la deposición seca en modelos regionales y globales

Revisa la documentación de los modelos europeos EMEP (<http://www.emep.int/UniDoc/node11.html>) y MATCH (<http://www.mpch-mainz.mpg.de/~kuhlmann/rvkdishtml/node22.html>).

- ¿En qué se diferencian los tratamientos de las tasas de deposición de dióxido de azufre y ozono en el modelo EMEP? ¿Son tales diferencias consistentes con lo que se muestra en: <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~ganzevl/VdO3.html> y <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~ganzevl/VdSO2.html> ?
- Discute cuán distintas o similares son las parametrizaciones de deposición seca en las escalas global y regional según estos modelos.
- ¿Cuál es el principal sumidero de ozono en horas de la noche en un lugar como Santiago?

25) Razón de mezcla de estado fotoestacionario

En ausencia de compuestos orgánicos volátiles y en presencia de luz solar, se establece una razón de mezcla de equilibrio de ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de nitrógeno (NO). A esa razón se la conoce en la literatura inglesa como “Photo-stationary state, PSS”.



a) Deduzca la razón de mezcla de equilibrio fotoestacionario de O_3 (PSS) en términos de las reacciones indicadas en la figura. Suponga que la producción y destrucción de NO y NO_2 se compensan.

b) Usando lo encontrado en a), determine la razón de mezcla en estado fotoestacionario del $\text{O}_3(\text{g})$, considerando los siguientes valores:

Presión: $p = 1013 \text{ hPa}$

Temperatura: $T = 298 \text{ K}$

Tasa de fotólisis de dióxido de nitrógeno: $J \approx 0.01 \text{ s}^{-1}$

Tasa de reacción entre ozono y monóxido de nitrógeno: $k = 1.8 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ moléculas s}^{-1}$

Razón de mezcla de monóxido de nitrógeno: $\chi_{\text{NO}}(\text{g}) = 5 \text{ pptv}$

Razón de mezcla de dióxido de nitrógeno $\chi_{\text{NO}_2}(\text{g}) = 10 \text{ pptv}$

Lectura recomendada:

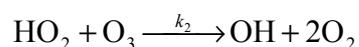
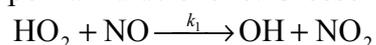
Capítulo 5, Seinfeld, J. y Pandis, S., 1998/2006. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air pollution to climate change*, J. Wiley and Sons, Inc.

Lectura sugerida:

Reich, S., Magallanes, J., Dawidowski, L., Gómez, D., Groselj, N., & Zupan, J. (2006). An Analysis of Secondary Pollutants in Buenos Aires City. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119, 441–443.

26) “Suficiente NOx”

Los procesos de producción fotoquímica de ozono prevalecen sobre los procesos de destrucción en la medida que la oxidación de NO ocurre por la vía de peróxidos y no por la vía de ozono. Grosso modo, la competencia relevante es entre las reacciones:



¿Qué condición deben satisfacer las reacciones anteriores de modo que prevalezca la producción de ozono?

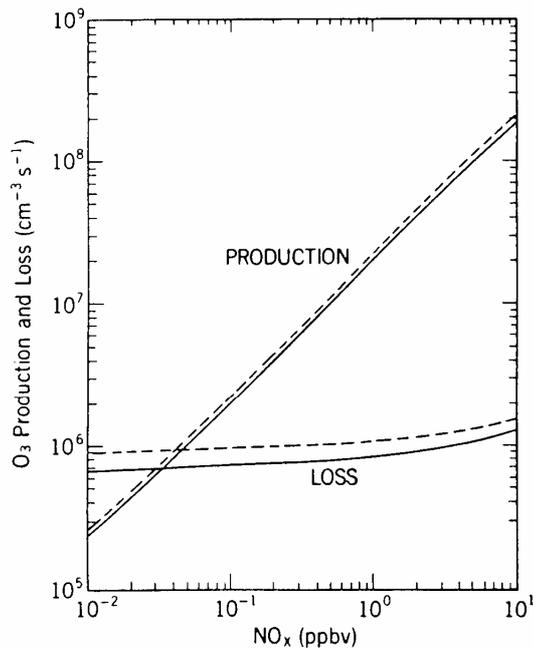


Figure 2* Ozone production for different values of nitrogen oxides concentrations. From Liu and Trainer (1988).

*Reprinted by the permission of Kluwer Academic Publishers

Lectura recomendada: <http://www.ciesin.columbia.edu/docs/011-457/011-457.html>

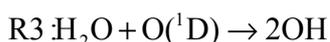
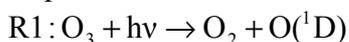
27) NO_x y HO_x

En la tropósfera, el óxido nítrico (NO) reacciona con ozono produciendo dióxido de nitrógeno (NO₂) y oxígeno molecular. El óxido nítrico también reacciona con el radical hidroperóxido (HO₂) para producir NO₂ y radical hidroxilo (OH). Por su parte, el NO₂ es rápidamente fotolizado dando lugar a la formación de NO y oxígeno atómico. El oxígeno atómico se recombina rápidamente con oxígeno molecular (a través de una tercera molécula inerte) y produce ozono.

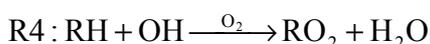
- Escribe las reacciones descritas en el párrafo anterior.
- Escribe el sistema de ecuaciones que representan la evolución temporal de NO, O₃, NO₂, HO₂, OH y O
- ¿A qué se reduce el sistema anterior si se omite a la familia HO_x?

28) Ozono urbano

La producción de ozono en la atmósfera contaminada se inicia a través de:

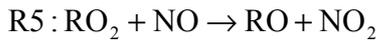


y se propaga a través de la reacción del radical hidroxilo (OH) con hidrocarburos (RH):

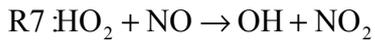
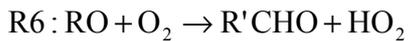


La importancia relativa de los distintos hidrocarburos puede ser medida en términos de su abundancia y su reactividad con OH. En general, la reactividad crece con el tamaño de los hidrocarburos.

El radical RO_2 reacciona con NO para producir NO_2 y un oxi-radical orgánico RO :



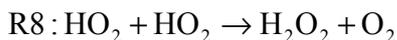
El dióxido de nitrógeno se fotoliza y produce ozono. El radical RO puede evolucionar de muchas maneras: puede reaccionar con oxígeno molecular, descomponerse térmicamente o isomerizarse. Típicamente, se producen carbonilos ($\text{R}'\text{CHO}$) e hidroperóxido (HO_2). Genéricamente, se puede escribir:



El carbonilo puede fotolizarse o producir HOx o reaccionar con OH continuando la cadena de propagación. Si se considera la fotólisis de NO_2 , el resultado neto de las reacciones R4 a R7 es:



La cadena termina con la pérdida de radicales HOx . Esto puede ocurrir de dos formas principales. Si las concentraciones de NO no son muy elevadas, los HOx autoreaccionan produciendo peróxidos y otros compuestos oxigenados:



Cuando hay suficientes óxidos de nitrógeno, el sumidero principal de HOx es:



- a) Sabiendo que sólo la fotólisis de NO_2 permite la formación de ozono, identifica las reacciones responsables de la producción de ozono en el mecanismo anterior y establece la tasa de producción de ozono. Vale notar que en una atmósfera “sucia” se puede suponer que la cadena de oxidación es muy eficiente y por lo tanto la expresión se puede aproximar según:

$$P_{\text{O}_3} = 2k_7[\text{HO}_2][\text{NO}]$$

- b) ¿Cuál es la concentración de OH correspondiente a un equilibrio de estado estacionario? OH se produce según R7 y se destruye según R4.
c) Se puede mostrar que en estado estacionario que la producción de HOx queda dada por:

$$P_{\text{HO}_x} = k_8[\text{HO}_2]^2 + k_9[\text{NO}_2][\text{OH}][\text{M}]$$

- i. Si hay “poco” NOx (régimen limitado por NOx), ¿de qué depende la producción de ozono? Muestra que:

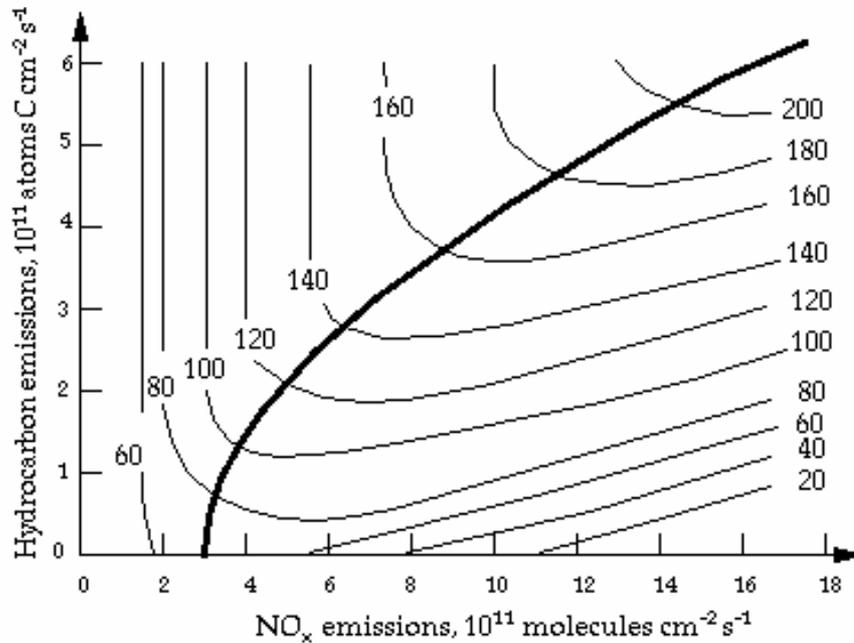
$$P_{\text{O}_3} = 2k_7 \left(\sqrt{\frac{P_{\text{HO}_x}}{k_8}} \right) [\text{NO}]$$

¿en qué sector de la figura de isopletras de ozono es válida esta expresión?

- ii. Si hay “mucho” NO_x (régimen limitado por hidrocarburos), ¿de qué depende la producción de ozono? Muestra que:

$$P_{O_3} = \frac{2k_4 P_{HO_x} [RH]}{k_9 [NO_2] [M]}$$

¿en qué sector de la figura de isopletas de ozono es válida esta expresión?



Lectura recomendable: Chap. 12 in Introduction to Atmospheric Chemistry, by Daniel J. Jacob, Princeton University Press, 1999. (Ver: <http://www-as.harvard.edu/people/faculty/djj/book/>)

29) Observaciones disponibles: una comparación entre Santiago, Sao Paulo, Los Angeles y París.



- a) ¿Qué datos sobre ozono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno hay disponibles en las páginas web de las autoridades ambientales en Santiago, Sao Paulo, Los Angeles y París? Haz una tabla que contenga el número de estaciones disponibles, las variables medidas, el método e instrumento de medición usados, los períodos cubiertos, la frecuencia de los datos, etc..
- b) En cada ciudad, elige la estación que presente los valores máximos de ozono y para esa estación describe la variabilidad interdiaria y el ciclo diario. ¿Qué similitudes y diferencias hay entre ellas? Considera las condiciones de radiación solar y ventilación de cada ciudad así como su población.

Considera como punto de partida las páginas:

- Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana de Santiago: <http://www.seremisaludrm.cl/sitio/pag/aire/indexjs3aireindgasesdemo.asp>
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- South Coast Air Management District: <http://www.aqmd.gov/smog/index.html>
- AirParif: <http://www.airparif.asso.fr>

30) Observaciones en ciudades y en lugares remotos: Santiago vs. Tololo

La Dirección Meteorológica de Chile mantiene desde mediados de 1990 una estación de monitoreo de ozono en el Observatorio Astronómico de Cerro Tololo como parte del Programa de Monitoreo Global de la Atmósfera (GAW: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html). Compara los datos allí recogidos con los datos descritos en la primera pregunta para la estación de Las Condes. Incluye también una descripción del método de medición usado en Tololo. Explica las diferencias encontradas.



NB. Para información sobre la estación de Cerro Tololo contactar a su operador Sr. Luis Valle

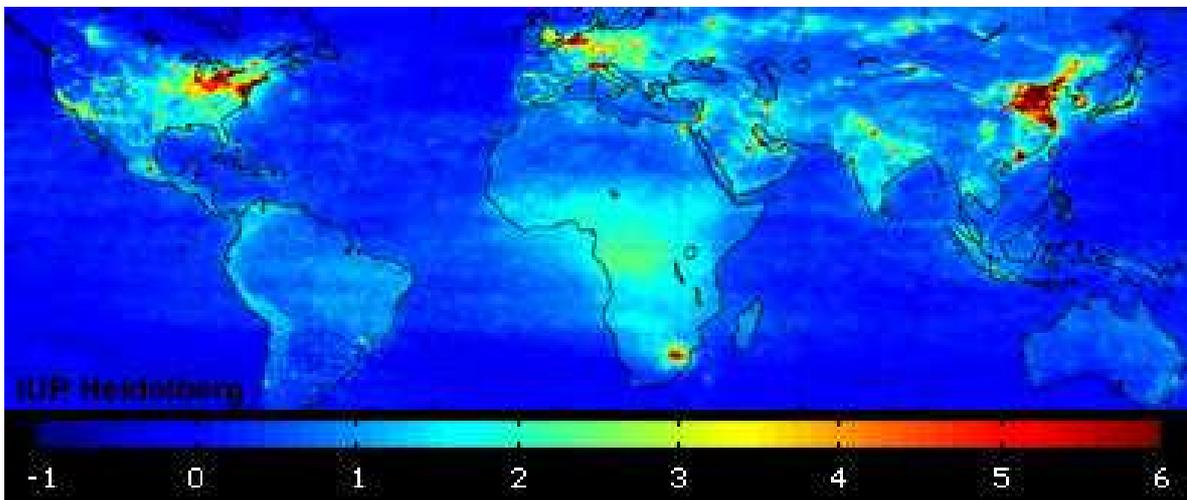
31) Observaciones satelitales de la calidad del aire

- a) Discute los principios de medición y la confiabilidad de las observaciones de: ozono, formaldehído y dióxido de nitrógeno desde plataformas satelitales actualmente en uso.
- b) ¿Son tales observaciones relevantes en los casos de Santiago, Bogotá y Buenos Aires? Explica de qué manera son o no relevantes y sugiere de qué modo se podrían mejorar.

Lectura recomendada:

Special Issue on Satellite Retrievals of Tropospheric Chemistry.
http://www.igac.noaa.gov/newsletter/igac35/Mar_2007_IGAC_35.pdf

Consulta también: 1) NASA: <http://nasascience.nasa.gov/earth-science/applied-sciences/national-applications/air-quality>; 2) ESA: http://www.esa.int/esaCP/SEM340NKPZD_Protecting_1.html



32) Modelos de libre disposición de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América

Revisa la página: <http://www.epa.gov/ebtpages/resemmodels.html>

¿Qué modelos están disponibles?, ¿para qué aplicaciones se recomiendan?

33) Modelos Gaussianos

Una central térmica emite 1 kg de SO₂ por segundo desde una chimenea de 100 m de altura. Estima la concentración media de SO₂ en el suelo 1 km al norte de la central si:

- a) El viento es sur y de 10 m/s. La altura efectiva de la chimenea es de 130 m.
- b) El viento es de dirección 200° y de intensidad 3 m/s. La altura efectiva de la chimenea es de 70 m.

En ambas situaciones se observó una radiación solar moderada. Empíricamente se han determinado clases de estabilidad y valores de las desviaciones estándar en las direcciones horizontal (σ_y) y vertical (σ_z). Estas quedan especificadas según:

i) Clases de Estabilidad à la Pasquill-Gifford (Ver Zannetti 1990).

Viento (m/s)	Insolación fuerte	Insolación moderada	Insolación débil	Nubosidad nocturna superior a 4/8	Nubosidad nocturna superior a 4/8
<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

ii) Sigmas à la Pasquill-Gifford (Ver Zannetti 1990). Unidad: m

$$\sigma_y(x) = \frac{k_1 x}{[1 + (x / k_2)]^{k_3}}$$

$$\sigma_z(x) = \frac{k_4 x}{[1 + (x / k_2)]^{k_5}}$$

donde x es la distancia a la fuente viento abajo (en metros) y las constantes k_1, k_2, k_3 y k_4 son:

Clase de estabilidad	de k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
A	0.250	927	0.189	0.1020	-1.918
B	0.202	370	0.162	0.0962	-0.101
C	0.134	283	0.134	0.0722	0.102
D	0.0787	707	0.135	0.0475	0.465
E	0.0566	1070	0.137	0.0335	0.624
F	0.0370	1170	0.134	0.0220	0.700

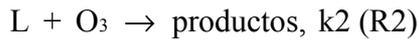
34) El aroma de los bosques de cítricos



Figura. Compuesto limonina e imagen de árbol o arbusto cítrico

La limonina (L) es un hidrocarburo que emiten los árboles cítricos. En la atmósfera esta sustancia reacciona con ozono (O₃) y radicales hidroxilo (OH) de acuerdo a:





a) Calcula la vida media de la limonina respecto de las reacciones R1 y R2. Considera que la razón de mezcla de ozono es 60 ppbv y la de OH es 1 pptv. Las tasas de las reacciones son:

$$k_1 = 3.7 \text{ ppbv}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$k_2 = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ ppbv}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

b) ¿Se puede despreciar el efecto de las reacciones con OH y O₃ sobre la concentración (c) de la limonina a 70 m de altura sobre la capa de los árboles si uno compara con el efecto del transporte turbulento? (Supón pinos de 20 m de alto).

Considera que con buena aproximación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - R_1 - R_2$$

donde z indica la dirección vertical y K_z es el coeficiente de “difusión” (mezcla turbulenta). K_z tiene un valor aproximado de 10 m² s⁻¹. En la capa superficial K_z es relativamente constante.

¡Busca una solución alternativa a resolver la ecuación diferencial anterior!. Considera que el tiempo característico de los procesos “difusivos” está dado por:

$$\tau = \frac{L^2}{K}$$

donde L es la distancia sobre la cual se realiza el proceso de transporte difusivo y K es el coeficiente de difusión característico.

¿Cuáles términos se han despreciado en la ecuación de continuidad anterior?, o bien, ¿cuáles procesos de transporte están considerados en este modelo y cuáles no?. ¿En qué referente está escrita la ecuación de continuidad anterior?

35) Validación de modelos

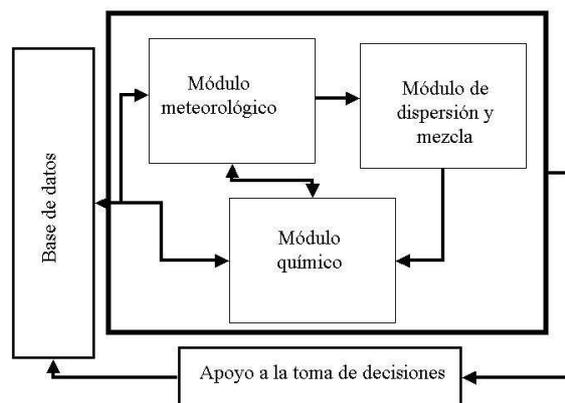


Figura. Aquí se muestra cómo se conectan los diversos módulos que conforman un modelo y cómo esta herramienta se integra al complejo proceso de la toma de decisiones.

Un grupo de ciudadanos está interesado en evaluar los impactos de la contaminación fotoquímica de Santiago sobre la actividad agrícola de la Región Metropolitana. Para ello contratan a un grupo de expertos que proponen usar un sistema de modelación como el del esquema siguiente:

- a) ¿Qué tipo de resolución espacial y temporal considerarías apropiado?
- b) ¿Qué tipo de mediciones serían necesarias para evaluar el modelo?

INDICE

1) Escala Sinóptica	1
2) La fricción y "el llenado" de las bajas presiones	1
3) Balance hidrostático	1
4) Escala de altura	2
5) Transformación de unidades	2
6) Transporte intercontinental de partículas	2
7) Tiempo de recambio y alcance de la dispersión	3
8) El compuesto de azufre más abundante de la atmósfera	4
9) Acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera	4
10) Tiempo de recambio y ciclos biogeoquímicos	5
11) Tiempo característico de remoción seca de dióxido de azufre (SO ₂)	5
12) Dispersión y circulación en dos ciudades	6
13) Ozono troposférico: la perspectiva global	6
14) Emisiones volcánicas	7
15) Inventarios de emisiones	7
16) Potencia Específica	8
17) Emisiones de óxidos de nitrógeno	8
18) Ecuación de continuidad en un modelo de dispersión global MOGUNTIA (Zimmermann, 1988).	9
19) Ecuación de continuidad en modelos usados en Chile	10
20) Un modelo simple de azufre oxidado	11
21) El efecto de la solubilidad	12
22) Dispersión atmosférica, tiempos de recambio y procesos de deposición.	12
23) Coeficientes de remoción húmeda ("scavenging")	13
24) Tratamiento de la deposición seca en modelos regionales y globales	13
25) Razón de mezcla de estado fotoestacionario	13
26) "Suficiente NO _x "	14
27) NO _x y HO _x	15
28) Ozono urbano	15
29) Observaciones disponibles: una comparación entre Santiago, Sao Paulo, Los Angeles y París.	17
30) Observaciones en ciudades y en lugares remotos: Santiago vs. Tololo	18
31) Observaciones satelitales de la calidad del aire	19
32) Modelos de libre disposición de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América	19
33) Modelos Gaussianos	19
34) El aroma de los bosques de cítricos	20
35) Validación de modelos	21