

GF 3022-1: Contaminación Atmosférica

Laura Gallardo, Profesora Asociada, Departamento de Geofísica, Directora del
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Universidad de Chile,
laura@dgf.uchile.cl

Foto: M. I. Cortez

LGK GF3022 SP 2017

Contenidos de hoy



- Tiempo de recambio
- Ecuación de continuidad
 - Términos
 - Deducción
 - Descomposición de Reynolds
 - Advección y mezcla turbulenta
 - Procesos y modularización

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c - c \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S$$

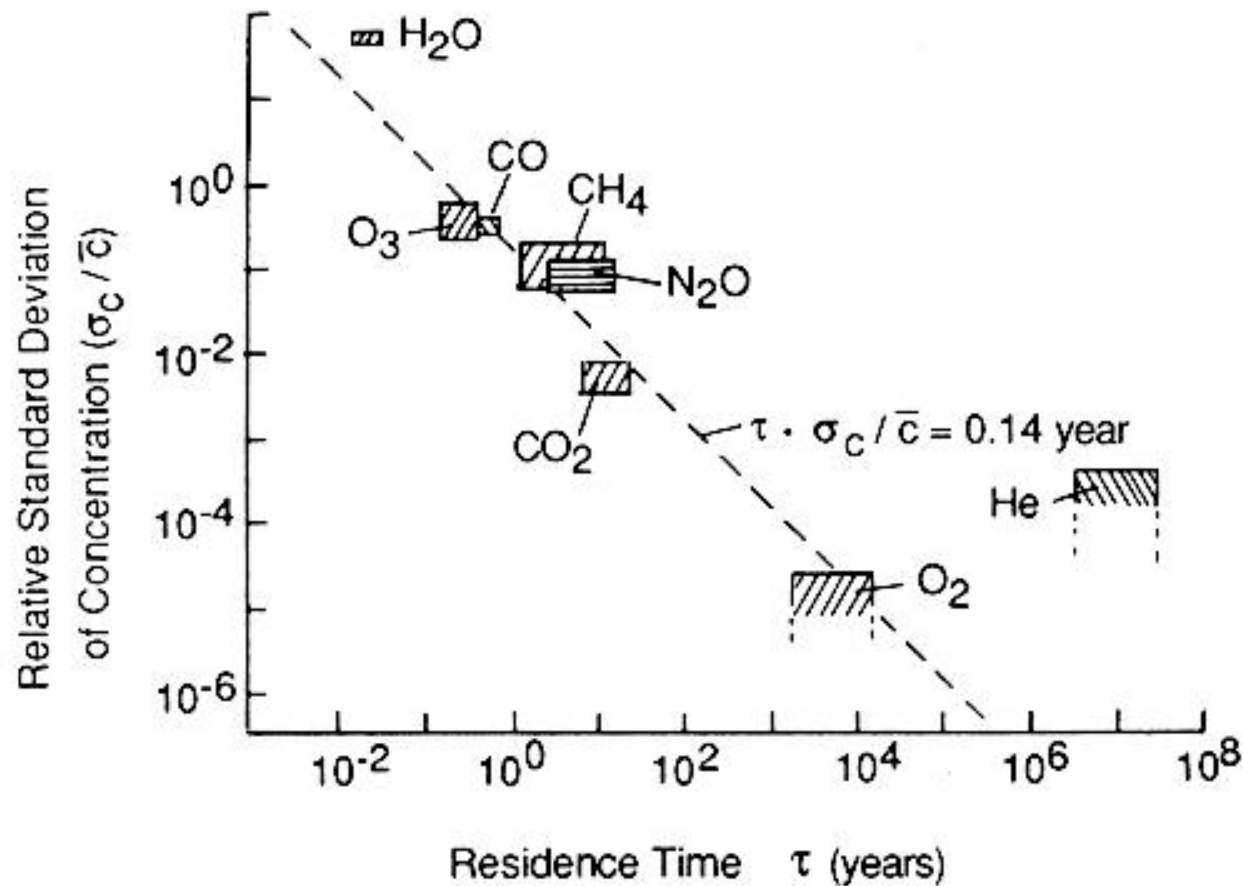
+CI & CB

Tiempo de Recambio τ *Turn-over time*

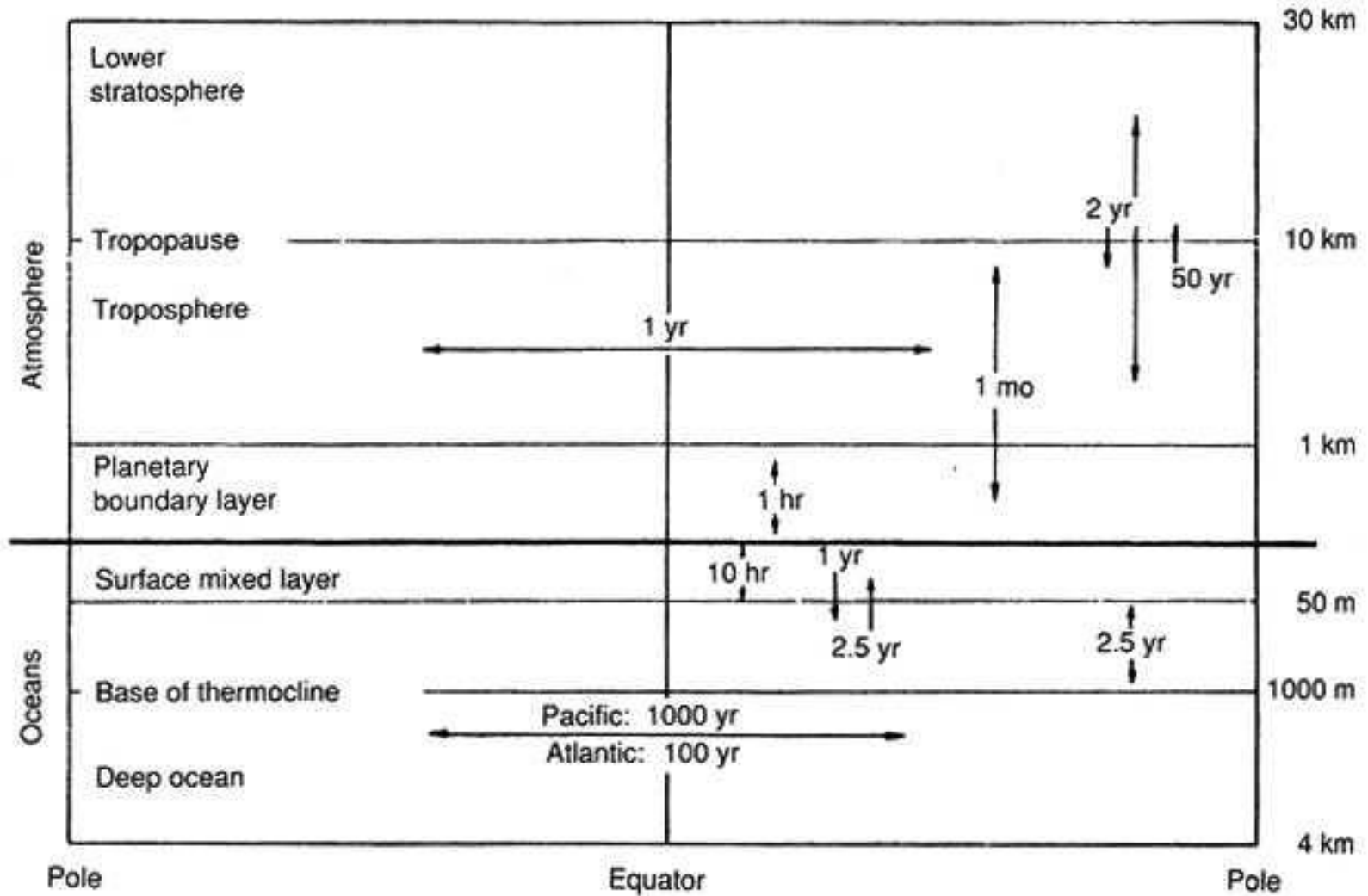


$$\tau = \frac{M}{S} [s] \quad \frac{dM}{dt} = Q - S$$

Tiempo de recambio y variabilidad



Tiempos característicos de mezcla



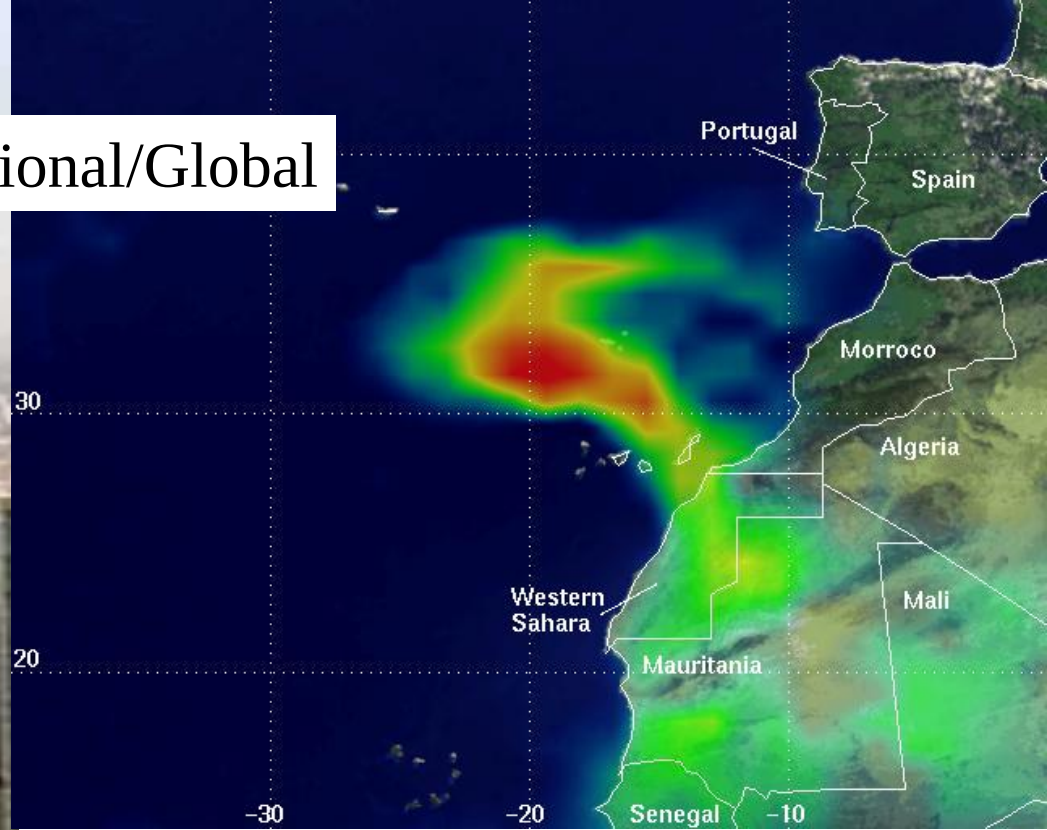
Escalas de tiempo y espacio características

Problema	Escala horizontal	Escala vertical	Escala de tiempo
Locales	<decenas de km	<cientos de m	< 1 hr
Mesoescálicos	decenas a cientos de km	< 1 km	<10 hr
Regionales	cientos a miles de km	<5 km	1-5 días
Globales	>miles de km	toda la atmósfera	> 1 año

Local/regional



Regional/Global



Local/micro

LGK GF3022 SP 2017





- Incendio en Groenlandia



- Beijing



Erupción del cordón Caulle



Asado dieciochero

Por hacer (y presentar en 3 transparencias)

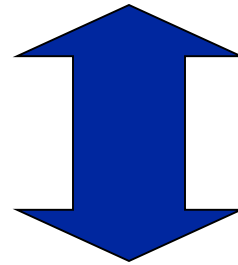
- Estimar las escalas espacial y temporal
- Identificar una traza atmosférica relevante y discutir su tiempo de recambio. ¿Qué se puede decir de la variabilidad espacial de las concentraciones de esta traza?
- ¿Hay un origen antrópico en estos problemas?
- ¿Qué efectos tienen los problemas presentados?

Subir a U-cursos!!!

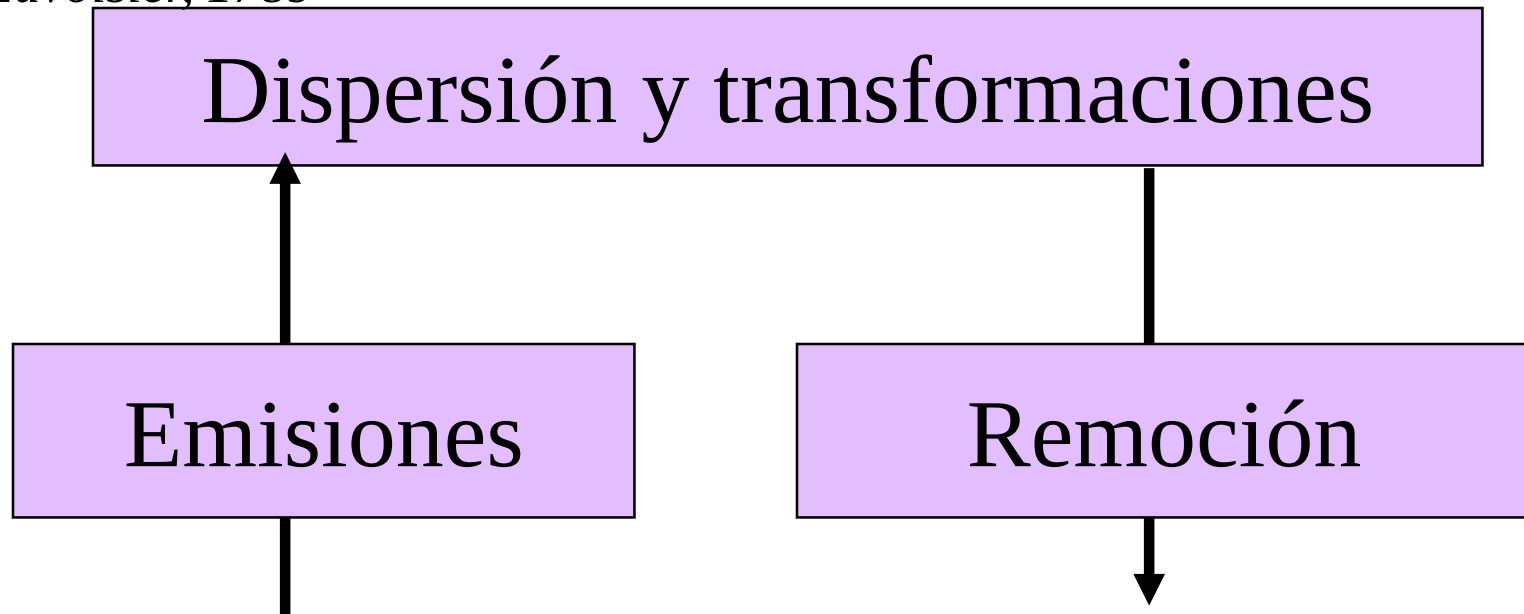
$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c - c \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S$$



Lavoisier, 1789



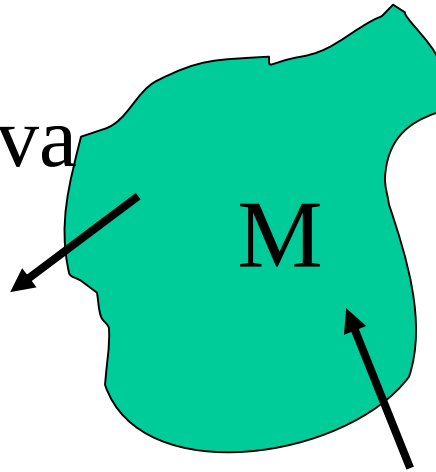
+CI & CB



¿De dónde viene la ecuación de continuidad?

Lavoisier (1789)
la masa se conserva

Sea un volumen
arbitrario V que
contiene una masa

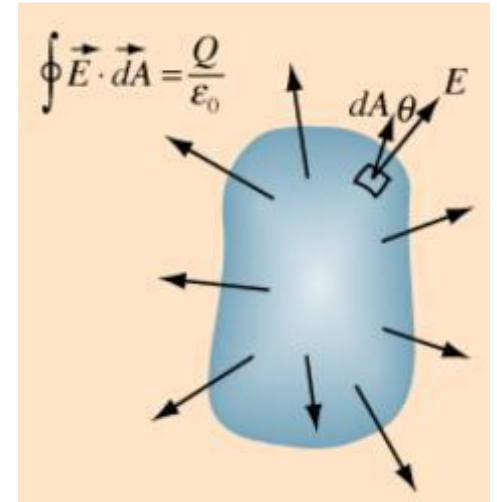
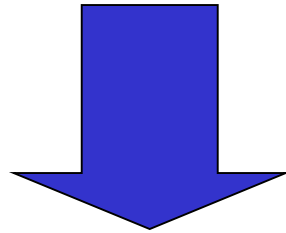


$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V c dV = \int_{A=\partial V} -\vec{F} \cdot d\vec{A} + \int_V (Q - S) dV$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V c dV = \int_{A=\partial V} -\vec{F} \cdot d\vec{A} + \int_V (Q - S) dV$$

Gracias a Gauss...

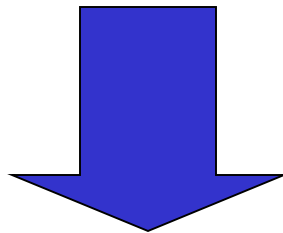
El flujo de un campo vectorial a través de una superficie cerrada S que contiene el volumen V es igual a la integral de la divergencia del campo vectorial sobre el volume V



$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V c dV = \int_V -\nabla \cdot \vec{F} dV + \int_V (Q - S) dV$$

Como V es arbitrario...

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V c dV = \int_V -\nabla \cdot \vec{F} dV + \int_V (Q - S) dV$$



*Hasta ahora, formalmente
correcto pero casi sin sentido
físico*

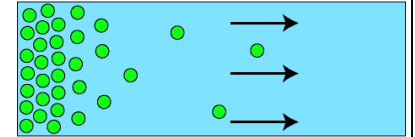
$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{F} + Q - S$$



Transporte
Atmosférico
¿Qué es F ?



Desorganizado e individual,
difusión molecular



Organizado y colectivo,
siguiendo el viento promedio

$$\vec{F} = c\vec{V}$$



Ergo...

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{F} + Q - S$$

*Tiene más sentido pero sigue
siendo una entelequia*

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c\vec{v}) + k\nabla^2 c + Q - S$$

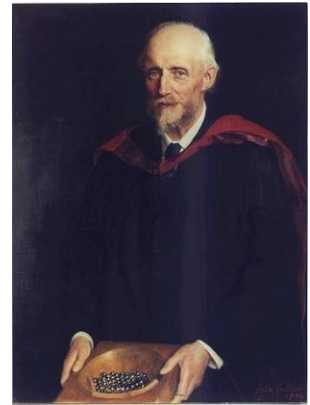


Pero en la práctica...

1. La difusión molecular es **casi** siempre despreciable

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c\vec{V}) + \cancel{\kappa \nabla^2 c} + Q - S$$

0

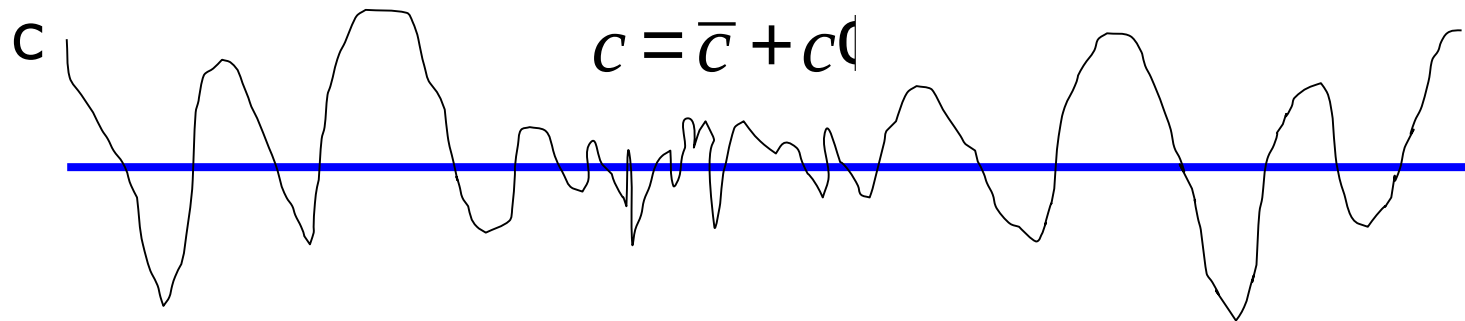


2. Las variables se conocen sólo como promedios temporales y/o espaciales (Partición de Reynolds)

$$c = \bar{c} + c' \quad \vec{V} = \bar{\vec{V}} + \vec{V}'$$

Partición de Reynolds

Las variables se pueden expresar en términos de un valor promedio y fluctuaciones en torno a este



Se cumple que

$$\overline{c'c'} = \overline{c'c} = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c \vec{V}) + Q - S$$

$$\frac{\partial(\bar{c} + c')}{\partial t} =$$

$$-\nabla \cdot ([\bar{c} + c'] [\bar{\vec{V}} + \vec{V}'])$$

$$+ [Q + Q'] - [S + S']$$

Partición de
Reynolds

Promediando

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\bar{\vec{V}} \cdot \nabla \bar{c} - \bar{c} \nabla \cdot \bar{\vec{V}} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{V}' \rangle) + \bar{Q} - \bar{S}$$

$$NB. \langle x \rangle \equiv \bar{x}$$

LGK GF3022 SP2015

LGK GF3022 SP 2017

Usando las identidades...

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla c$$

$$\nabla \cdot (c\vec{v}) = \vec{v} \cdot \nabla c + c \nabla \cdot \vec{v}$$

À la Euler...modelos Eulerianos (advección explícita)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c - c \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S$$

À la Lagrange...modelos Lagrangianos (advección implícita)

$$\frac{dc}{dt} = -c \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\langle c' \vec{v}' \rangle) + Q - S$$

Advección

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla c + \dots$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial y}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -w \frac{\partial c}{\partial z} \rightarrow 0$$

El arrastre a través del flujo medio (advección) prevalece en la horizontal pues, en general, los vientos horizontales son mucho mayores que los verticales.

Hay excepciones importantes



Lecturas recomendadas de hoy

- Rodhe, H., 2000: *Modeling Biogeochemical Cycles*, en *Earth System Science: from biogeochemical cycles to global change*. Vol. 72 en International Geophysics Series. Jacobson et al., editores. Elsevier Ltd.
- Jacob, 2007Cap 1
(http://acmg.seas.harvard.edu/education/jacob_lectures_ctms_chap1.pdf)