

Este trabajo tiene licencia bajo CC BY-NC-SA 4.0.

Para ver una copia de esta licencia, visite:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Para materiales traducidos, le sugerimos dar crédito al autor(es) original y a (los) traductor(es).



# **Sinopsis: Introducción a la técnica de covarianza de vórtices (eddy flux)**

Marcy Litvak, University of New Mexico, Albuquerque  
Kim Novick, Indiana University, Bloomington

Julio 26, 2022  
Niwot Ridge Curso Flux

Traducido por Ana Maria Restrepo Acevedo y Camilo  
Rey-Sanchez (anarestrepo@utexas.edu,  
areysan@ncsu.edu)

# ¿Qué es un flujo 'flux'?

- Transporte de materia (escalar) expresado con respecto a una unidad de área y de unidad de tiempo
- Tiene dirección y sentido
- Enfocado en los flujos de la superficie (intercambio de materia y energía entre la superficie y la atmósfera)
  - Dióxido de Carbono, Gas Metano, COV's, ozono, etc.....
  - Calor, Humedad, Momento
- Flujo de Dióxido de Carbono = “flujo de CO<sub>2</sub>” o Intercambio Neto del Ecosistema (Net Ecosystem Exchange, NEE por sus siglas en inglés)
  - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  r  $\text{g C m}^{-2} \text{dia}^{-1}$
  - Positivo (C añadido a la atmósfera) o negativo (C removido de la atmósfera, añadido al ecosistema)
- Calor (Flujo de Calor Sensible)
  - $\text{Watts m}^{-2}$  (Watt = J/s)
  - Positivo (Calor añadido a la atmósfera)
- Humedad (Flujo de Calor Latente = Evapotranspiración )
  - $\text{Watts m}^{-2}$  (Watt = J/s)
  - mm dia-1
  - Positivo (Humedad añadida a la atmósfera)

# Flujos a escala de ecosistemas

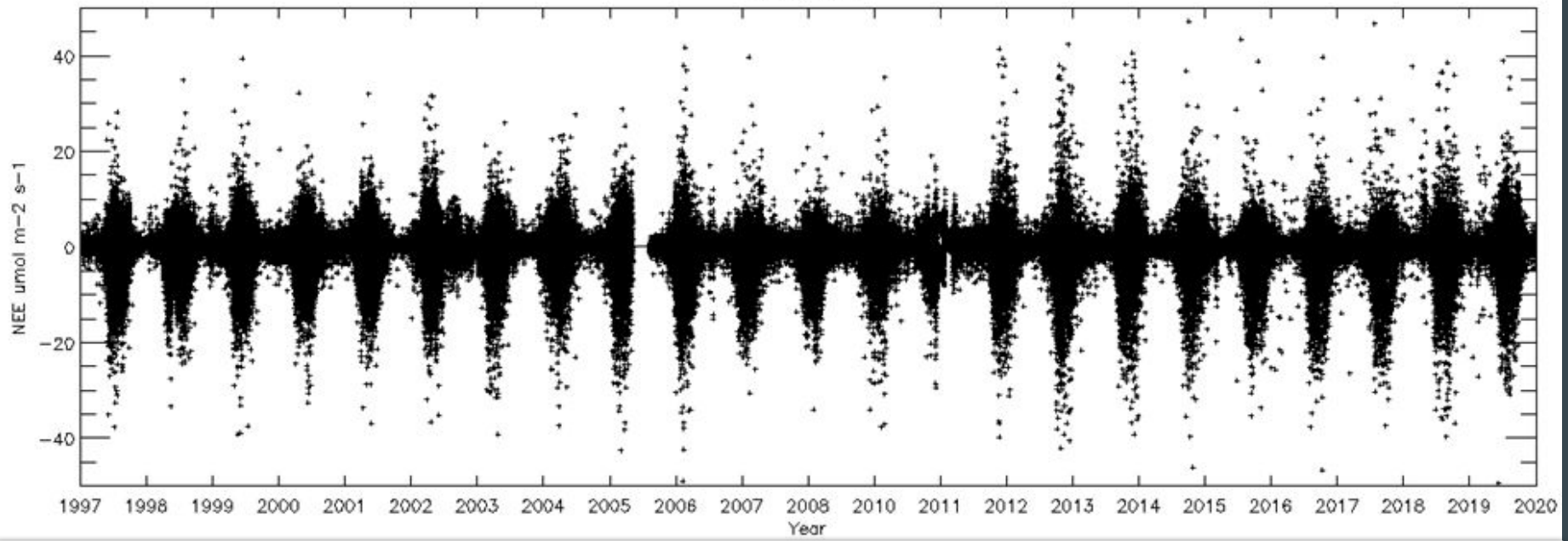
## Eddy Covariance



- Conocimiento de los procesos del ecosistema a nivel de sitio específico.
  - Tasas de secuestro de Carbono
  - Tasa de Evapotranspiración
  - Tasas de transferencia de calor turbulento desde la superficie hacia la atmósfera.
  - Recarga de agua subterránea.
- Tendencias a largo plazo y variabilidad interanual.

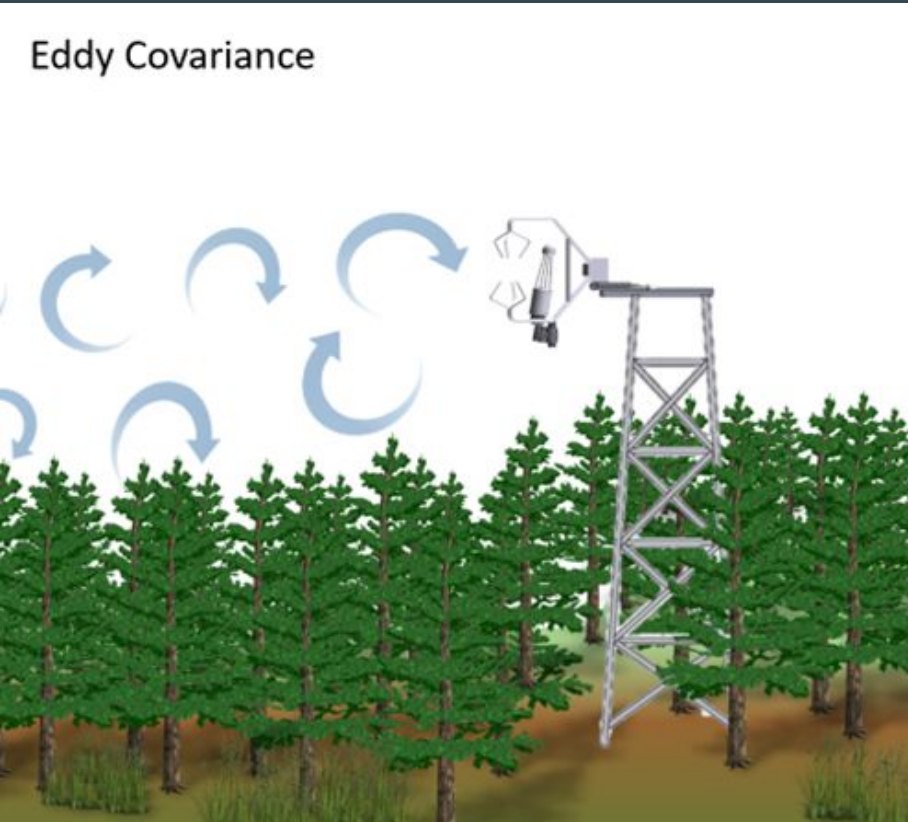


Park Falls



# Flujos a escala de Ecosistemas

## Eddy Covariance

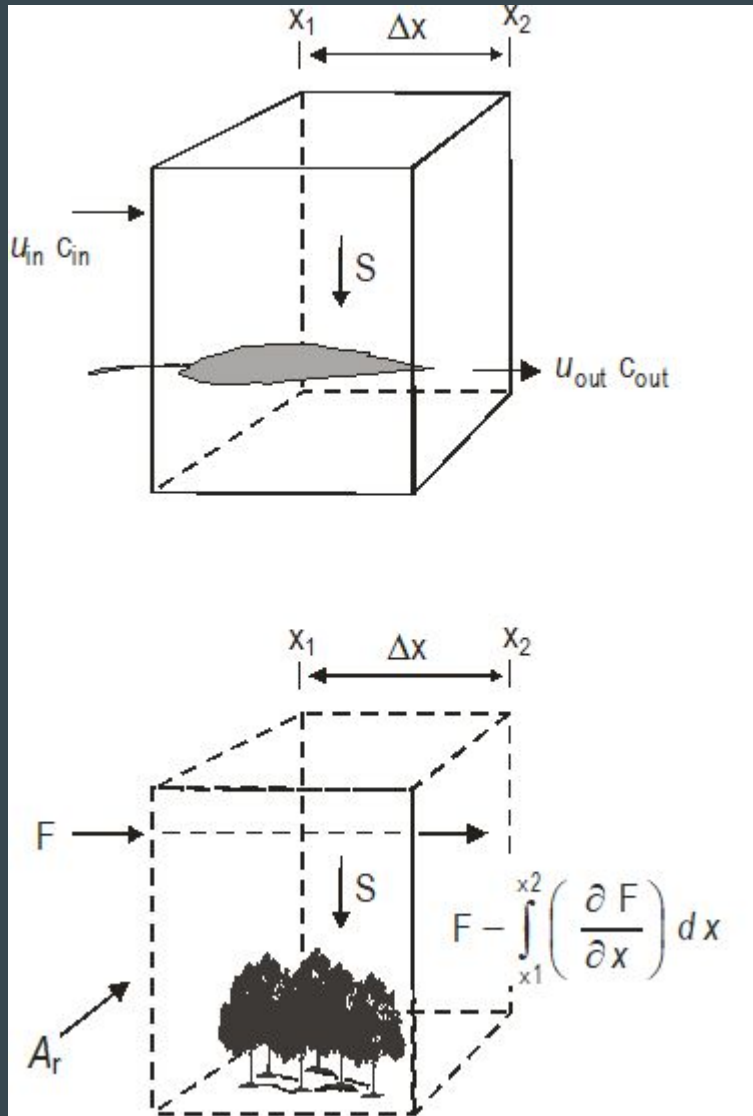


- Conocimiento de los procesos del ecosistema a nivel de sitio específico.
  - Tasas de secuestro de Carbono
  - Tasa de Evapotranspiración
  - Tasas de transferencia de calor turbulento desde la superficie hacia la atmósfera.
  - Recarga de agua subterránea.
- Tendencias a largo plazo, variabilidad interanual. - Soluciones Climáticas basadas en la Naturaleza
- Información temporal para las necesidades de inventario.
- Perturbaciones (incendios, brotes de insectos, fuego)
- Momentos controversiales.
- Apoyo en la toma de decisiones
- Validación de modelos globales
- Parametrizar modelos globales.
- Productos de percepción remota
- Poner a prueba los principios ecológicos

# ¡Escoge uno de estos sitios!





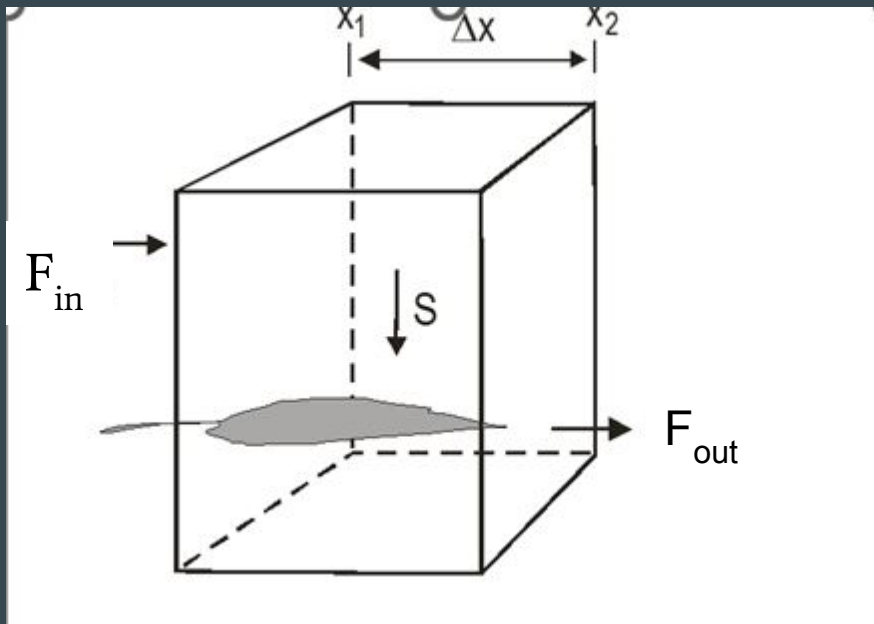


## Covarianza de vórtices (Eddy flux)

- Teoría básica y conceptos importantes.
- Enlazar conceptos entre flujos a nivel de hoja y a nivel de ecosistemas.
- Supuestos fundamentales y limitaciones.
- Terminos clave.
- Una red de torres!



# Flujos y unidades con la cámara Licor



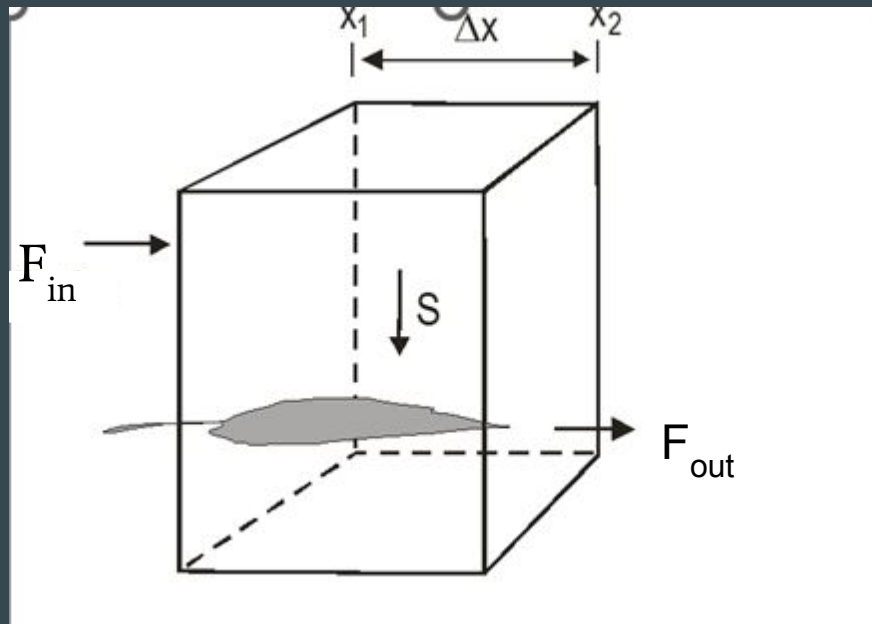
$$S = F_{\text{entra}} - F_{\text{sale}} \quad \frac{\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

$$=$$

$$F_{\text{entra}} = u_{\text{in}} c_{\text{in}} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}} \times \frac{1}{\text{m}^2 \text{ (leaf area)}} \rightarrow \text{Área de la hoja}$$

$$F_{\text{sale}} = u_{\text{out}} c_{\text{out}} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}} \times \frac{1}{\text{m}^2 \text{ (leaf area)}} \rightarrow \text{Área de la hoja}$$

# Los flujos pueden ser expresados como velocidad del aire (Velocidad de flujo multiplicado por una densidad molar)



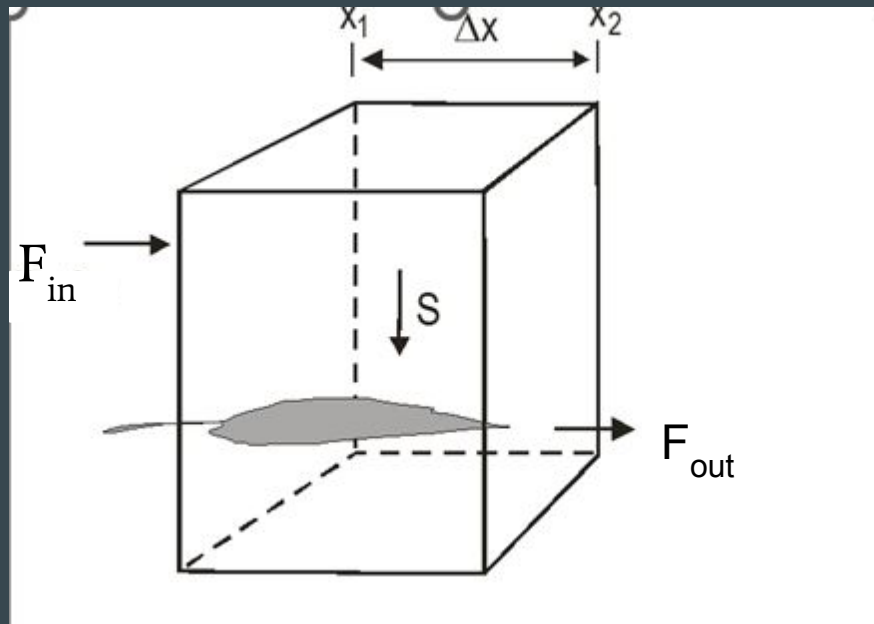
$$F_{\text{entra}} = u_{\text{in}} c_{\text{in}} = \frac{m}{s} \times \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{m^3} \times \frac{1}{m^2(\text{leaf area})} \rightarrow \text{Área de la hoja}$$

$$F_{\text{sale}} = u_{\text{out}} c_{\text{out}} = \frac{m}{s} \times \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{m^3} \times \frac{1}{m^2(\text{leaf area})} \rightarrow \text{Área de la hoja}$$

$$S = F_{\text{entra}} - F_{\text{sale}} \quad \frac{\text{mol CO}_2}{m^2 s}$$

=

El flujo puede ser expresado como la velocidad del aire (Velocidad de flujo multiplicado por una densidad molar):



$$F_{entra} = \rho_a u_{in} c_{in} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}}$$

density  Mole fraction

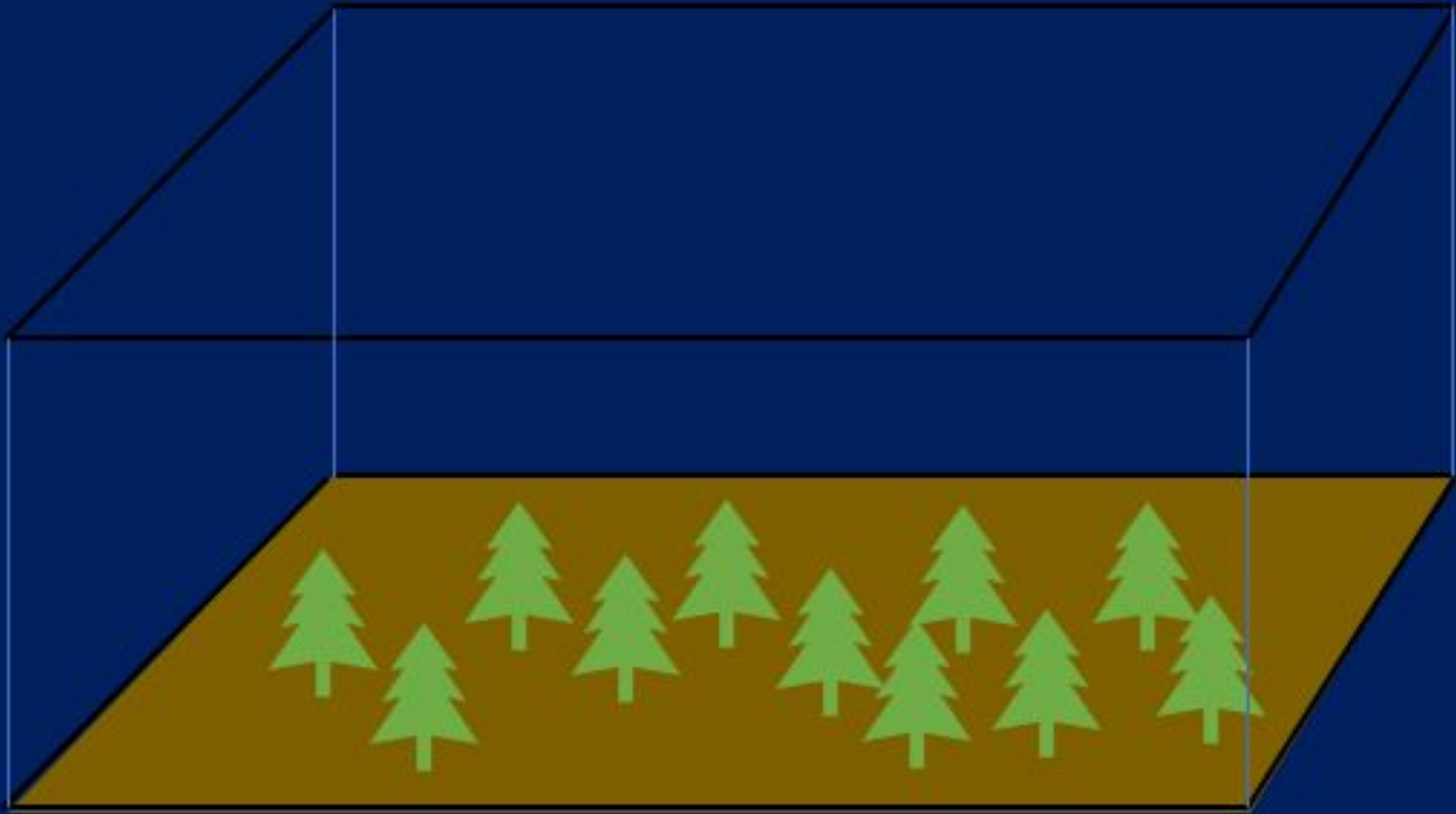
$$F_{sale} = \rho_a u_{out} c_{out} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}}$$

density  Mole fraction

$$S = F_{entra} - F_{sale} \quad \frac{\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

=

Ahora, ¿Qué cambia cuando aumentamos a la escala de ecosistemas?





# Necesitamos considerar los flujos en la atmósfera y la turbulencia

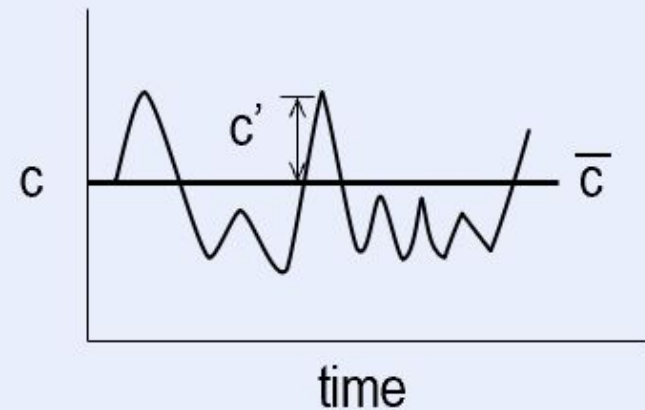
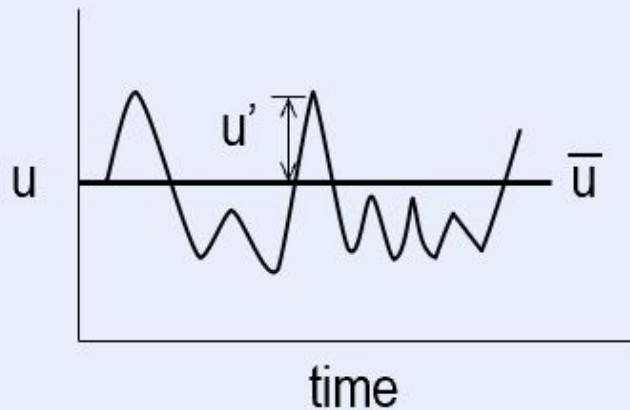
- No es consistente, ni en velocidad, ni en dirección.
- El viento no se mueve a velocidad constante cuando pasa por el anemómetro - se “tropieza”
- En cualquier instante de tiempo, la velocidad registrada por el anemómetro refleja un **componente promedio** y un **componente en turbulencia**.

## Reynold's averaging

barra = tiempo  
Promediando

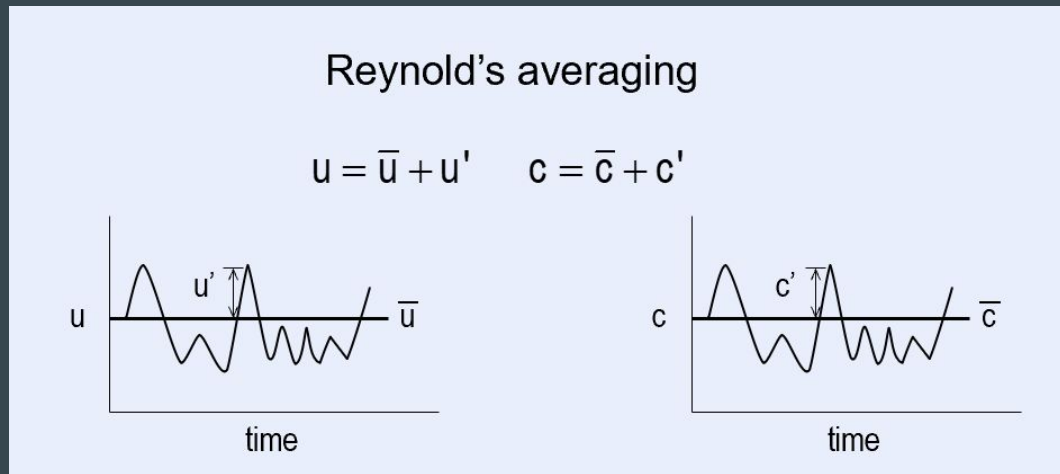
prima = desviación del  
valor promedio en el  
tiempo.

$$u = \bar{u} + u' \quad c = \bar{c} + c'$$



# Eddy flux: Covarianza de Turbulencia

- Covarianza estadística entre la componente turbulenta del viento (velocidad del viento horizontal) y la concentración de la entidad escalar transportada por la componente turbulenta del viento



Queremos el flujo promedio en el tiempo

$$\overline{uc}$$

$$\overline{uc} = \overline{(\bar{u} + u')(\bar{c} + c')} = \overline{\bar{u}\bar{c}} + \overline{\bar{u}c'} + \overline{\bar{c}u'} + \overline{c'u'} = \bar{u}\bar{c} + \overline{c'u'}$$

$\bar{c}' = 0 \quad \bar{u}' = 0$

advección

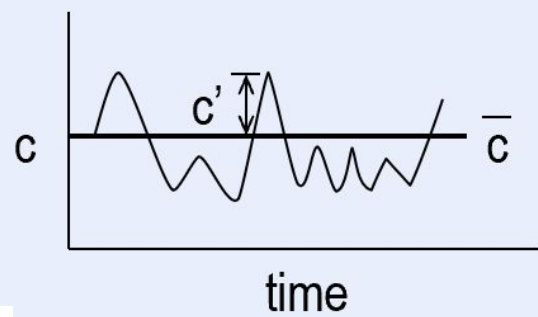
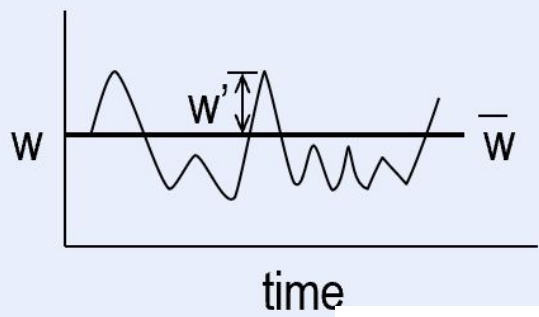
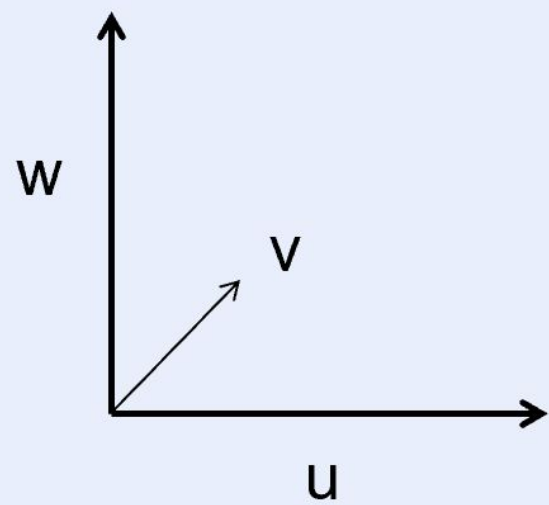
covarianza

# La covarianza en la que estamos interesados es la covarianza en la turbulencia vertical

$$\overline{c'w'}$$

## Reynold's averaging

$$w = \bar{w} + w' \quad c = \bar{c} + c'$$



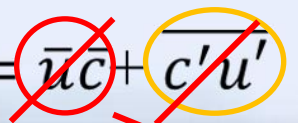
$$\bar{w} = 0$$

$$\overline{uc} = \overline{u\bar{c}} + \overline{c'u'}$$

$$\overline{wc} = \overline{w\bar{c}} + \overline{c'w'}$$

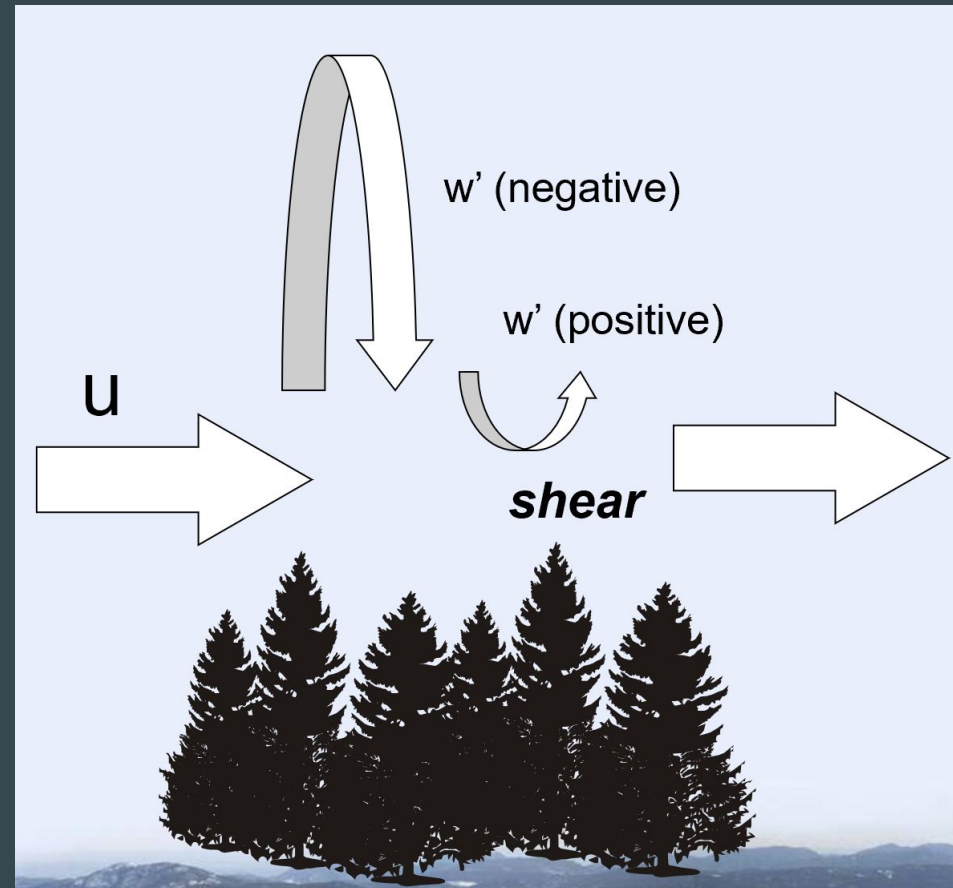
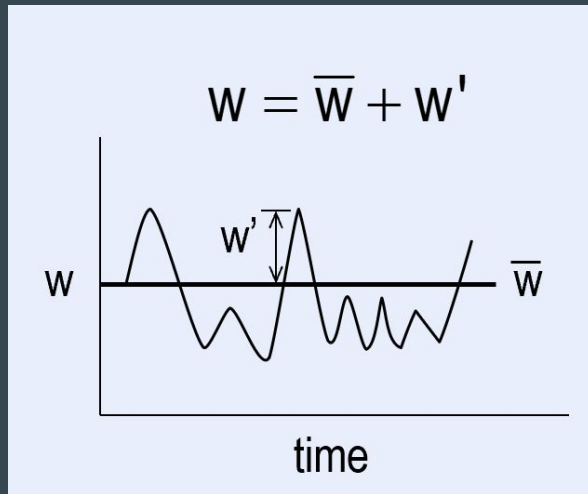
Advección

Covarianza



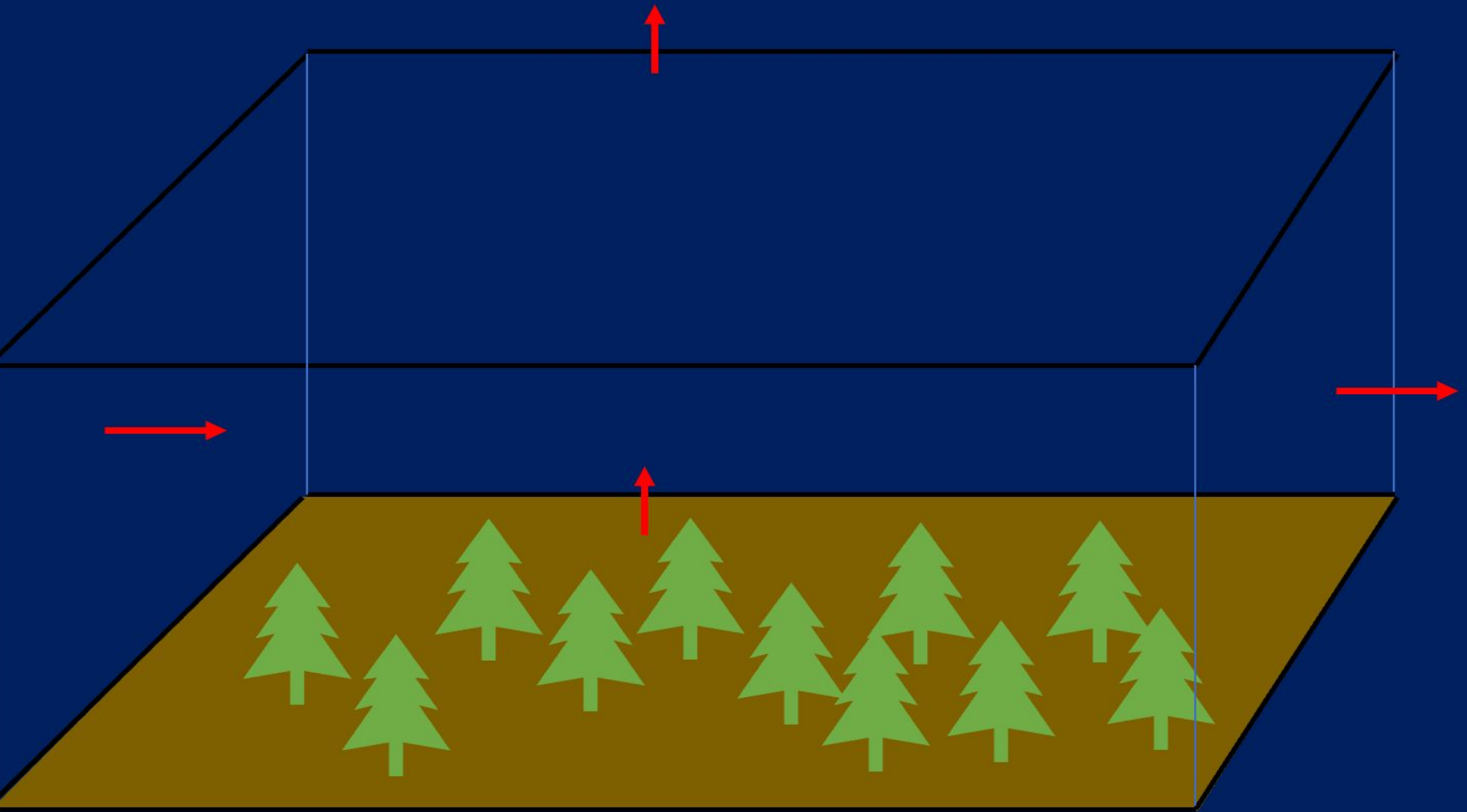
# ¿Qué impulsa el flujo turbulento vertical?

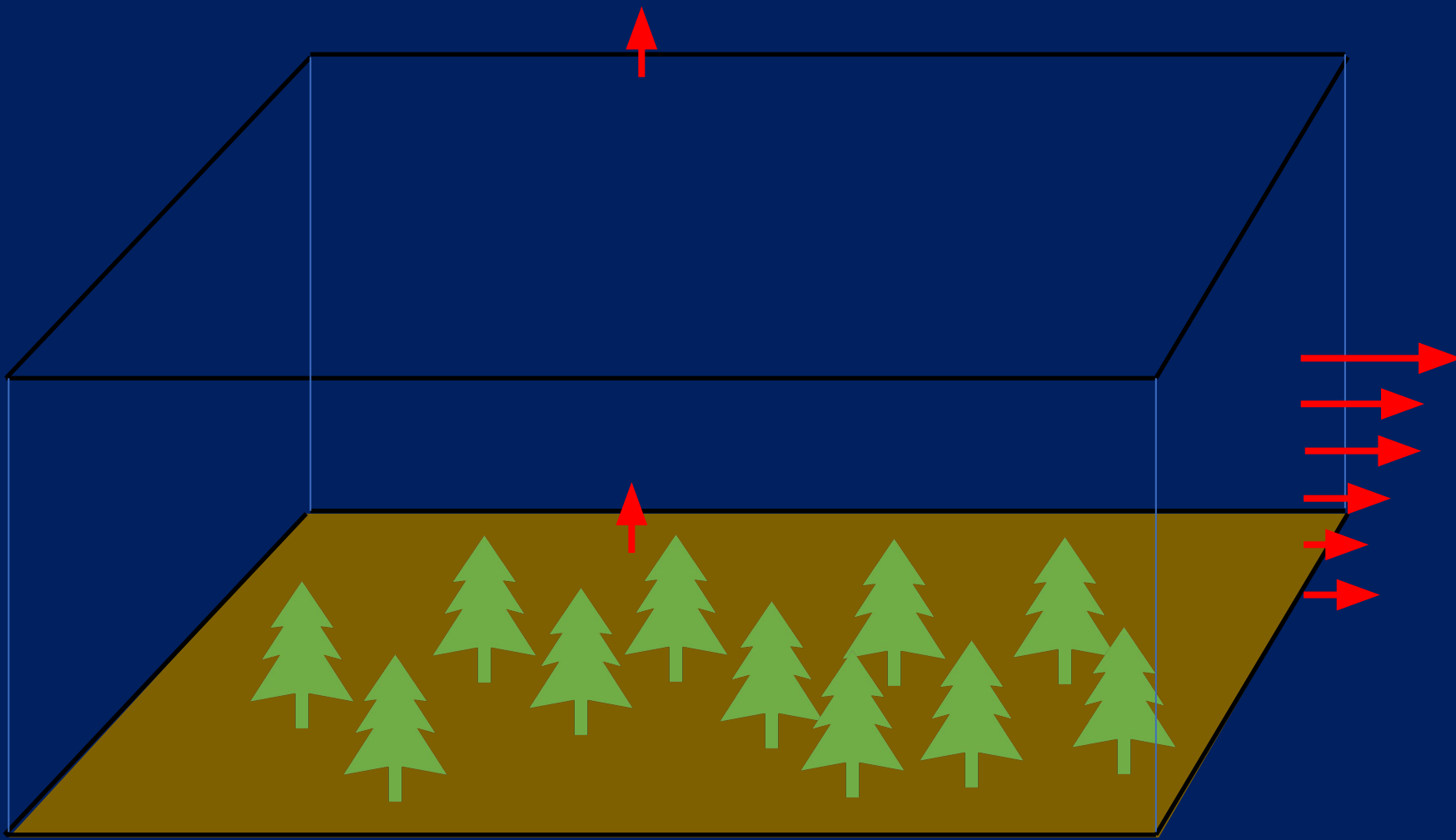
- Fuerza de corte (shear stress)
- Aspereza
- Fricción
- Remolinos





¿Qué pasa si abrimos la caja?





- 
- 
- 
- 
- 
- 

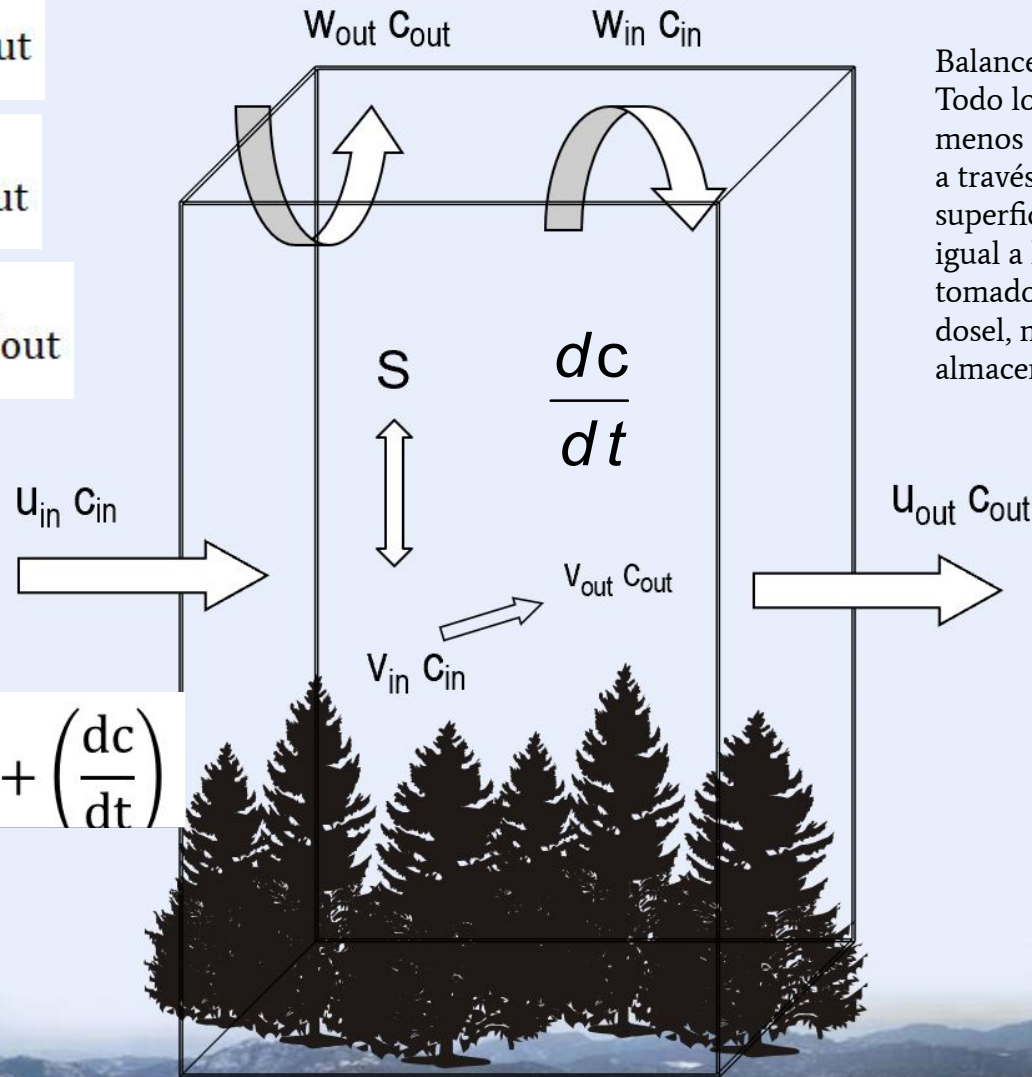
El viento funciona en un sistema coordinado de 3 dimensiones (3D), entonces el flujo de vectores no es tan organizado como es en la cámara de la hoja (Licor)

$$\Delta F_x = u_{in}c_{in} - u_{out}c_{out}$$

$$\Delta F_y = v_{in}c_{in} - v_{out}c_{out}$$

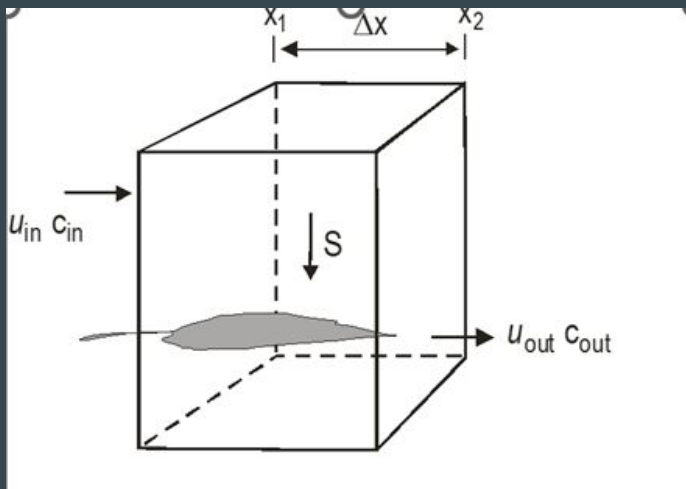
$$\Delta F_z = w_{in}c_{in} - w_{out}c_{out}$$

$$\frac{\Delta F_x}{\Delta x} + \frac{\Delta F_y}{\Delta y} + \frac{\Delta F_z}{\Delta z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$



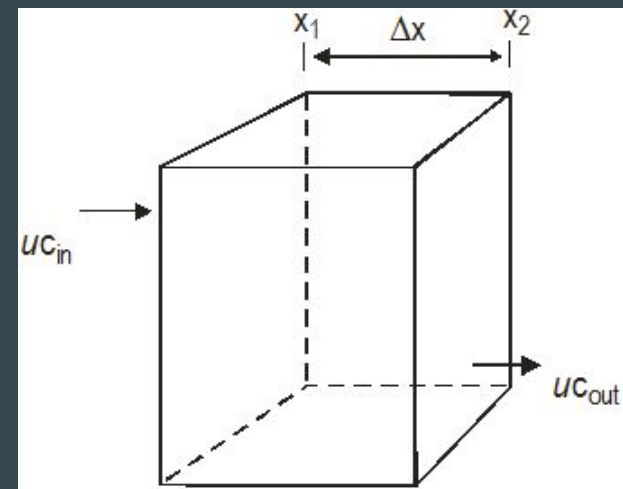
Balace de Masas:  
Todo lo que entra  
menos todo lo que sale  
a través de las  
superficies de la caja es  
igual a lo que es  
tomado/liberado por el  
dosel, más  
almacenamiento

# Balance de Masas - Clave para recordar en este punto



$$S = U_{in} C_{in} - U_{out} C_{out}$$

El cambio en la concentración de la cantidad en el volumen fijo debe coincidir con la actividad de fuente/sumidero



$$S = U_{in} C_{in} - U_{out} C_{out}$$

En una cámara vacía (sin fuentes o sumideros)

$$F_{in} = F_{out} \text{ and } \Delta c / \Delta t = 0.$$



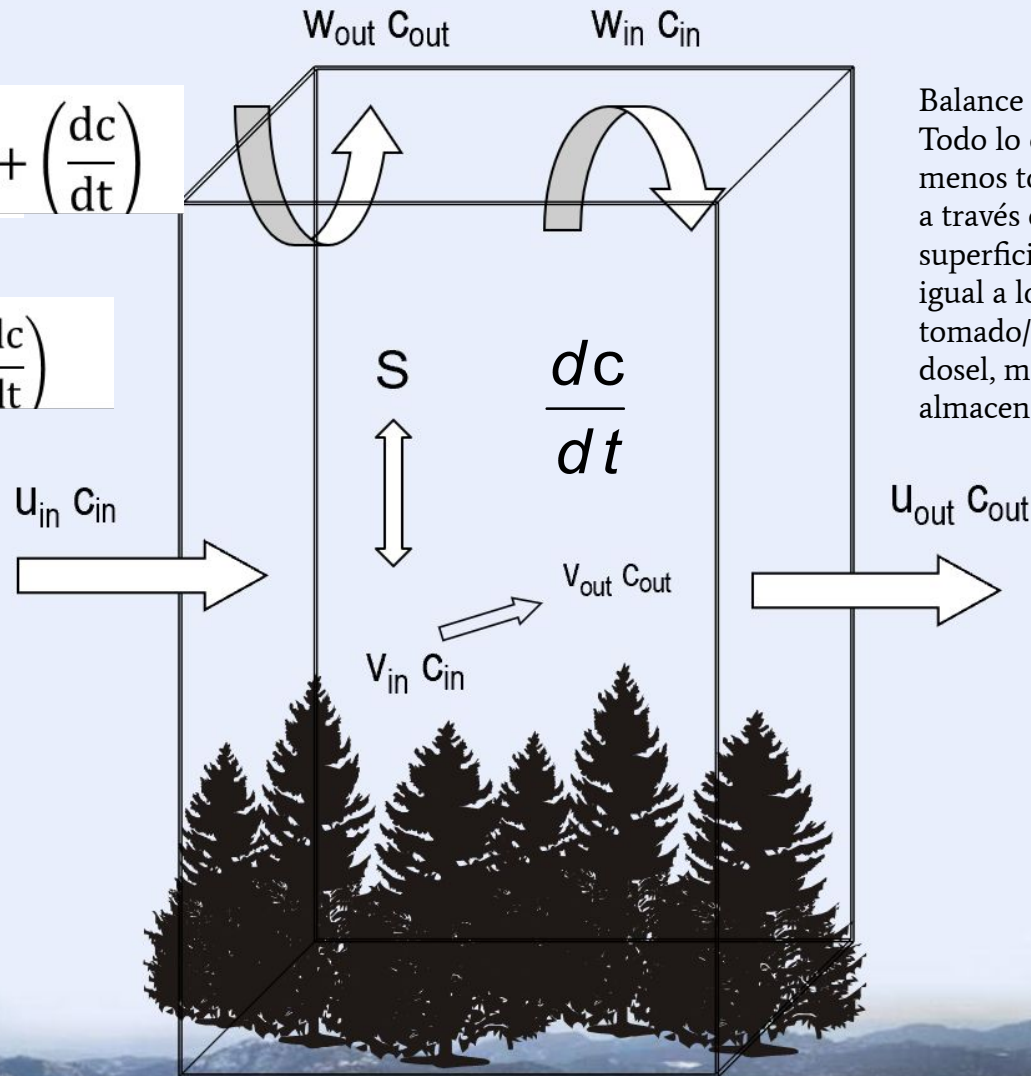
$$\frac{\Delta F_x}{\Delta x} + \frac{\Delta F_y}{\Delta y} + \frac{\Delta F_z}{\Delta z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$

~~$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$~~

Si asumimos homogeneidad horizontal, los gradientes horizontales anulan

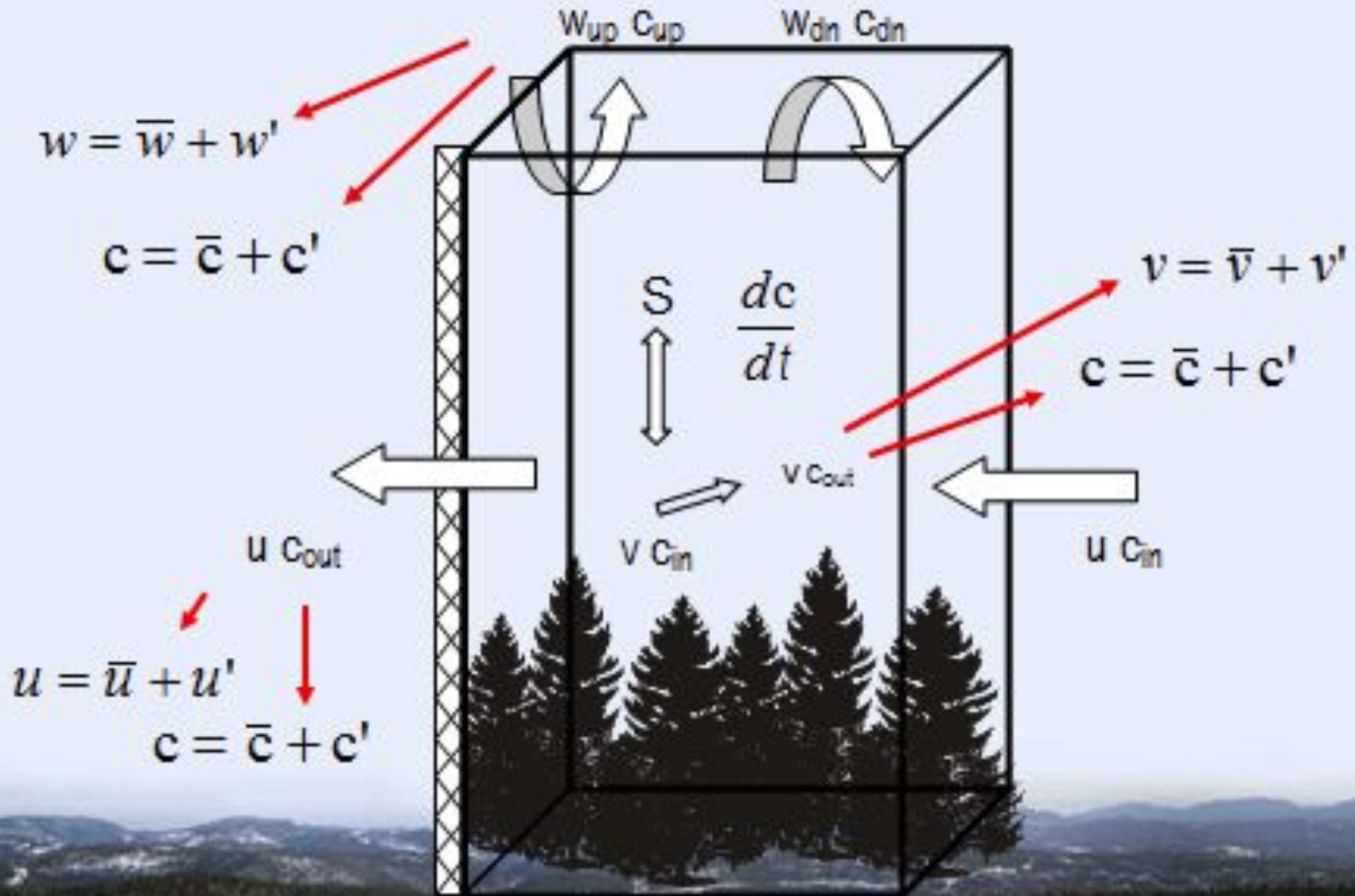
$$\frac{\partial}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = 0$$



Balace de Masas:  
 Todo lo que entra menos todo lo que sale a través de las superficies de la caja es igual a lo que es tomado/liberado por el dosel, más almacenamiento

Aplicando el promedio de Reynolds a los flujos de viento en nuestro volumen de control hipotético.

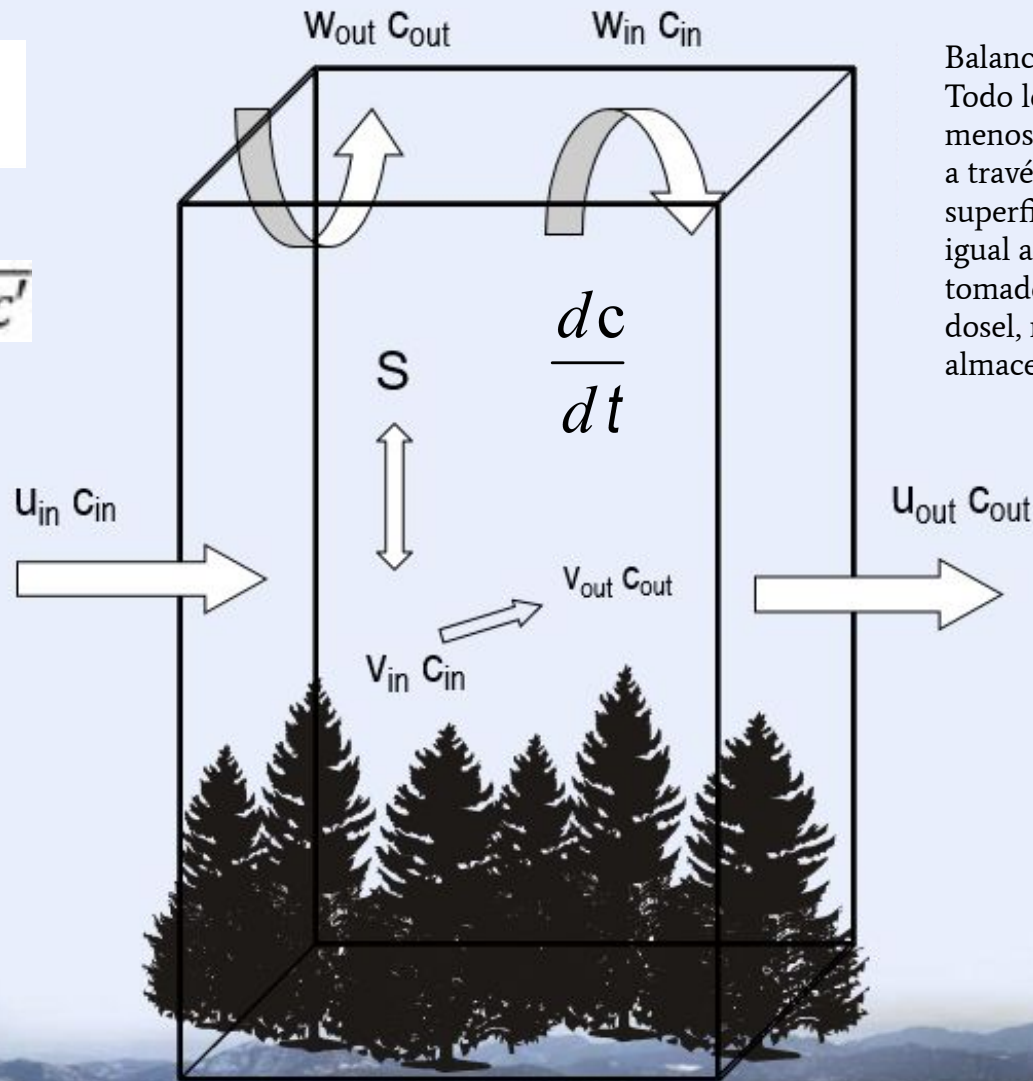


$$\frac{\partial F_z}{\partial z} = S + \left( \frac{dc}{dt} \right)$$

$$F_z = \overline{wC} = \overline{w}C + \overline{w'c'}$$

$$\overline{w} = 0$$

$$\frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} = S + \left( \frac{dc}{dt} \right)$$

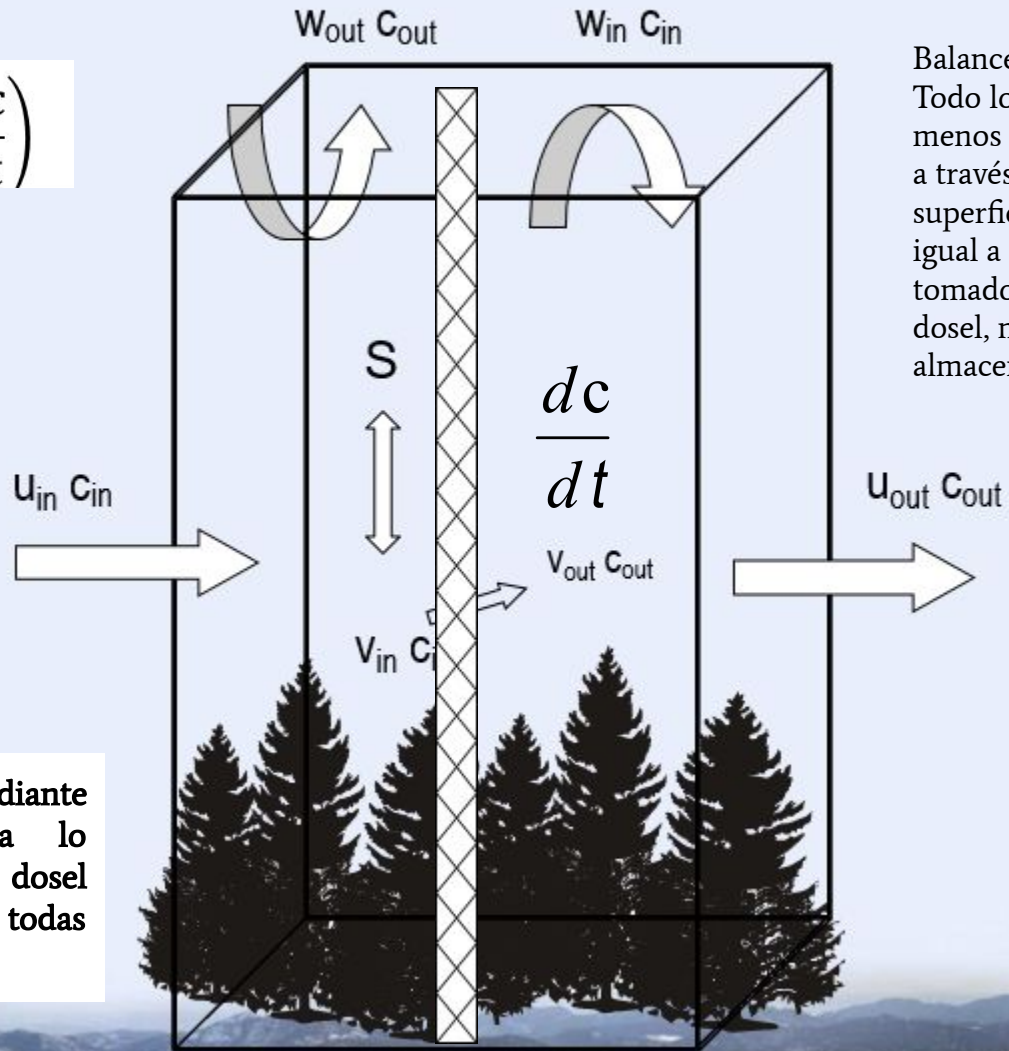


Balance de Masas:  
 Todo lo que entra  
 menos todo lo que sale  
 a través de las  
 superficies de la caja es  
 igual a lo que es  
 tomado/liberado por el  
 dosel, más  
 almacenamiento

$$\frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$

$$\int_0^h \frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} dz = \int_0^h S dz = F_c$$

Supuestos: Un flujo medido mediante una sistema de covarianza lo suficientemente alto en el dosel representa un flujo integrado a todas las alturas.



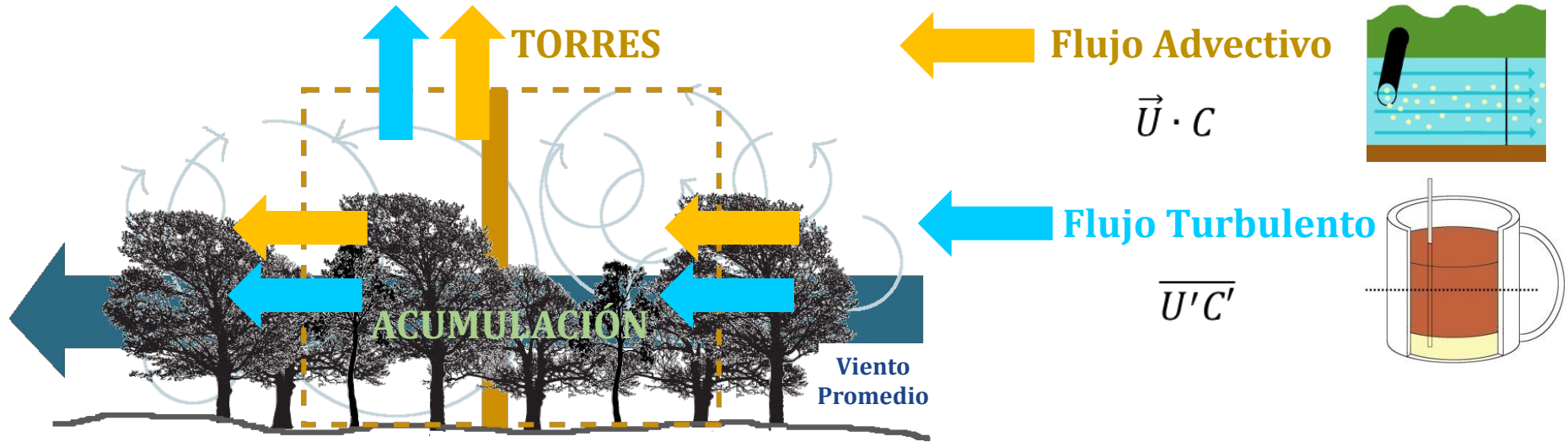
Balace de Masas:  
 Todo lo que entra menos todo lo que sale a través de las superficies de la caja es igual a lo que es tomado/liberado por el dosel, más almacenamiento

$$\int S(z) dz = \int \frac{\partial C}{\partial t} dz + \overline{w'c'}$$

Y por supuesto.....no podemos ignorar el almacenamiento



# Supuestos fundamentales y limitaciones



$$NEE = \int_0^z \frac{\partial \overline{u\bar{c}}}{\partial x} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{v\bar{c}}}{\partial y} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{w\bar{c}}}{\partial z} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} dz + \int_0^z \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz$$

**Flujo Adveectivo in 3 direcciones**

**Flujo Turbulento en 3 direcciones**

**Acumulación**