

# Capítulo 8. Capa límite

## Física atmosférica

Alberto Carramiñana

INAOE, Tonantzintla, 16 de abril de 2024

# Capa límite - temas

1. La capa límite
2. Turbulencia atmosférica
3. Estructura vertical
4. Balance de energía en la superficie
5. Evolución
6. Efectos de superficie

# 1. Capa límite - la capa límite

- ▶ La superficie terrestre es la frontera inferior de la atmósfera.
- ▶ La capa límite es la frontera entre la superficie terrestre y la atmósfera libre.
- ▶ Espesor típico 1 a 2 km (10 a 20 % de la tropósfera) - puede variar desde decenas de metros hasta 4 km.
- ▶ La superficie, calentada por radiación solar, actúa como fuente de calor.
  - Circulación ascendente de aire y energía térmica con tendencia a establecer una distribución isotérmica.
  - Transporte de calor (+) por circulación convectiva turbulenta.
- ▶ La capa límite se caracteriza por un equilibrio entre turbulencia y estabilidad estática:
  - Superficie caliente + aire fresco  $\Rightarrow$  turbulencia convectiva  $\Rightarrow$  inestable.
  - Superficie fresca + aire caliente  $\Rightarrow$  estable.
- ▶ Capa límite acotada en la parte superior por una capa de inversión.
- ▶ La estructura de la capa límite evoluciona entre el día y la noche.

# 1. Capa límite - la capa límite

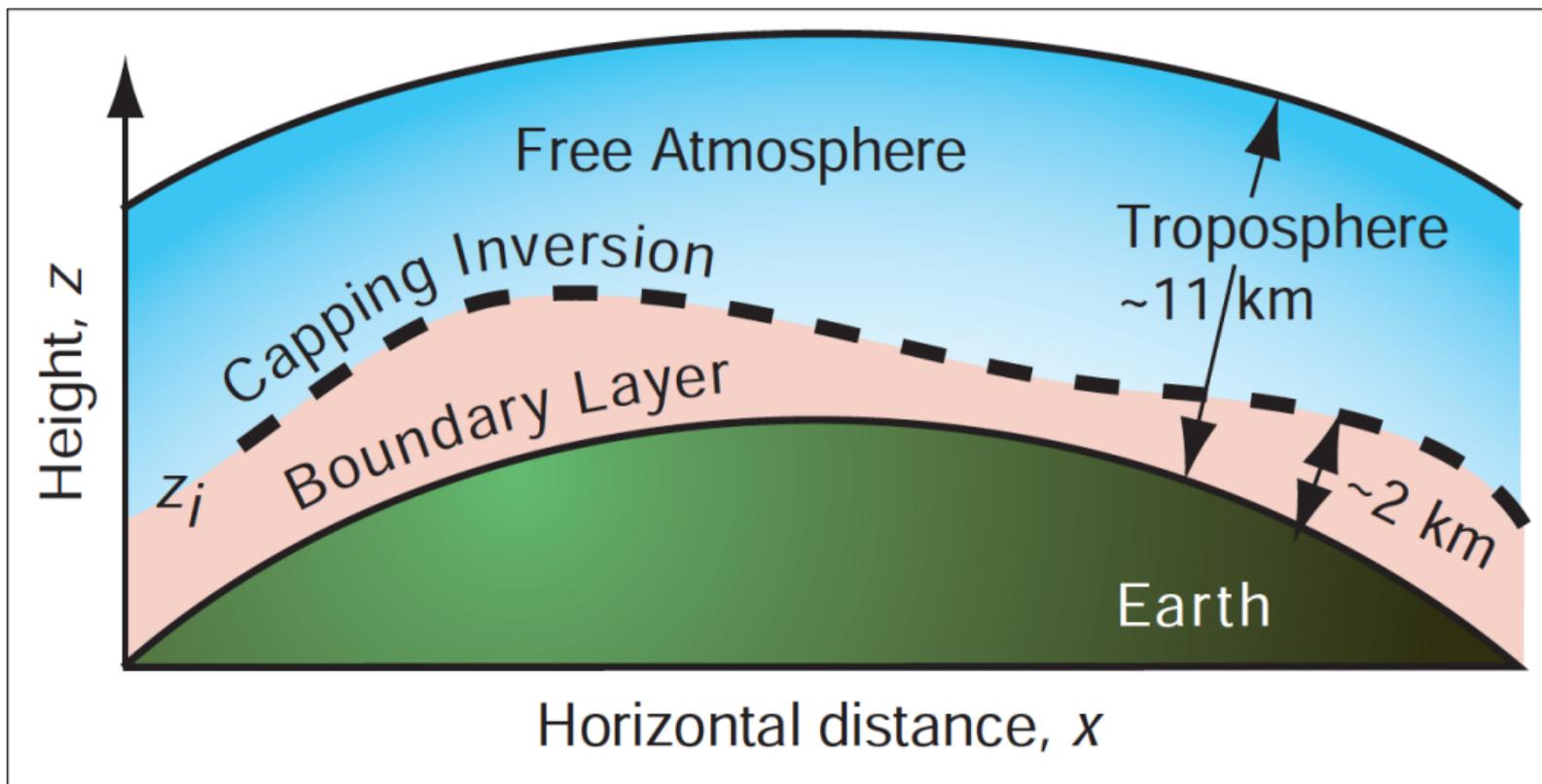


Fig. 9.1, Wallace & Hobbs

# 1. Capa límite - la capa límite

- ▶ En la capa límite se forman corrientes de aire que promueven las inestabilidades baroclínicas.
- ▶ La capa límite contiene calor y humedad, favoreciendo la formación de ciclones extratropicales.
  - Formación de vórtices verticales y formación de tornados o ciclones, por cambio de orientación.
- ▶ La capa límite está dominada por convección turbulenta:
  - La turbulencia es el proceso de transporte predominante en la capa límite.
  - La turbulencia actúa de manera análoga a la viscosidad.
  - La viscosidad es el mecanismo disipativo final de la turbulencia.

## 2. Turbulencia atmosférica - viscosidad

- ▶ La viscosidad es un proceso disipativo: convierte energía cinética en térmica.
- ▶ Intercambio de momento entre capas con movimientos diferenciados (capa rápida ↔ capa lenta) ⇒ tendencia a equilibrio cinemático y termodinámico.
- ▶ Descrita en la ecuación de Navier-Stokes con el coeficiente de viscosidad cinemática,

$$\nu = \ell v_T,$$

con  $\ell = (n\sigma)^{-1}$  camino libre medio,  $v_T = \sqrt{kT/\mu m_H}$  velocidad molecular media.

- ▶ Para un fluido 2D con velocidad  $\vec{V} = \hat{z}V(x, t)$  se tiene,

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \nu k^2, \quad (1)$$

para  $V(x, t) = V_0 e^{-\alpha t} e^{ikx}$ .

- ▶ Escala de tiempo:  $\alpha^{-1} \propto \lambda^2/4\pi^2\nu \simeq 1.7 \times 10^5 \text{s}$  para  $\lambda = 10 \text{m}$   
⇒ la viscosidad actúa lentamente y en escalas menores.

## 2. Turbulencia atmosférica - turbulencia

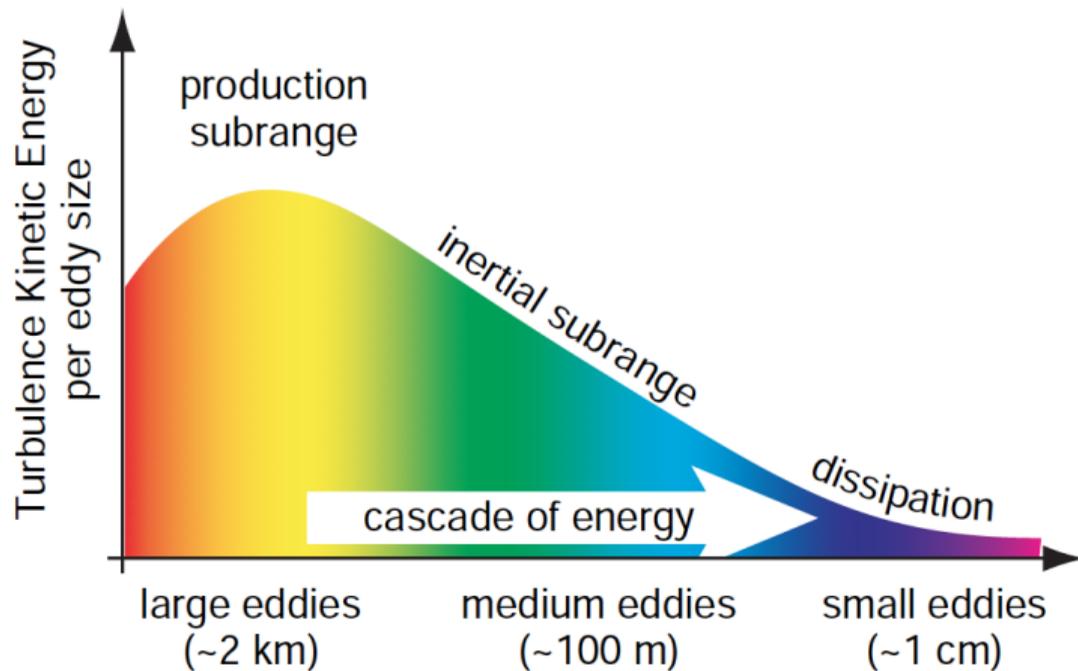
- ▶ La viscosidad no puede explicar la estructura de la capa límite.
- ▶ El transporte de energía es por turbulencia convectiva.
- ▶ La turbulencia funciona de manera análoga a la viscosidad, pero transporta energía cinética en escalas macroscópicas.
  - “eddies” - remolinos definen el equivalente del camino libre medio.
  - Origen térmico: convección inducida por superficies calientes.
  - Origen mecánico: turbulencia inducida en flujos de aire alterados por objetos.
- ▶ Rango inercial: celdas mayores se dividen en celdas menores, cubriendo un rango amplio de escalas, sin disipación de energía hasta alcanzar las escalas menores (viscosidad).

## 2. Turbulencia atmosférica - rangos de la turbulencia atmosférica

Dimensión	Denominación	Escala
20,000 km		Planetaria
2,000 km		Sinóptica
200 km	Meso- $\alpha$	Meso-escala
20 km	Meso- $\beta$	Meso-escala
2 km	Meso- $\gamma$	Meso-escala
200 m	Micro- $\alpha$	Turbulencia en capa límite
20 m	Micro- $\beta$	Capa límite superficial
2 m	Micro- $\gamma$	Rango inercial
2 mm	Micro- $\delta$	Turbulencia fina
$\mu\text{m}$	Molecular	Disipación viscosa

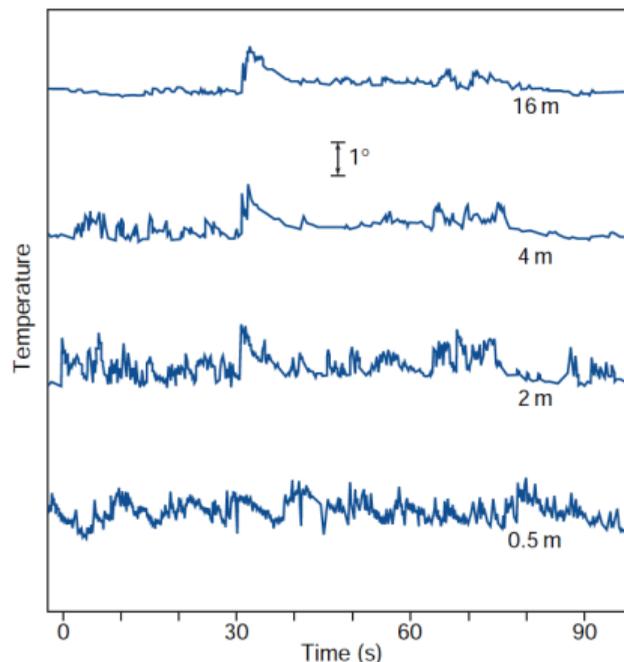
Tabla 1: Escalas de movimiento horizontal en la atmósfera (de tab. 9.1, W&H).

## 2. Turbulencia - espectro del régimen inercial



**Fig. 9.5** The spectrum of turbulence kinetic energy. By analogy with Fig. 4.2, the total turbulence kinetic energy (TKE) is

## 2. Turbulencia - descripción estadística



Temperatura a cuatro niveles, de *surface layer* → *mixed layer* (W&H, fig. 9.6).

Las variables relacionadas a la turbulencia se describen de forma estadística: variancias, covariancias y auto-covariancias temporales. Por ejemplo, para la velocidad del aire,

$$\sigma^2(u) = \langle u^2 \rangle - \langle u \rangle^2 = \langle (u - \bar{u})^2 \rangle = \langle u'^2 \rangle,$$

con  $\bar{u}$  promedio temporal o espacial.

Prima para  $u' = u - \bar{u}$ .

- ▶  $\sigma(u)$  independiente del tiempo = caso estacionario;
- ▶  $\sigma(u) = \sigma(v) = \sigma(w) =$  isotrópico.

La turbulencia convectiva es anisotrópica, dominada por movimientos verticales, hasta la capa de inversión.

## 2. Turbulencia - energía cinética en turbulencia

- ▶ La energía cinética contenida en la turbulencia (TKE: Turbulent Kinetic Energy), por unidad de masa, es análoga a la energía térmica,

$$\frac{\text{TKE}}{m} = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right).$$

- Flujo laminar  $\Rightarrow$  TKE = 0.
- ▶ De forma análoga a la ecuación de Navier-Stokes,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\text{TKE}/m) = Adv + M + B + Tr - \varepsilon \quad (2)$$

con el término de advección

$$Adv = -\bar{u} \frac{\partial}{\partial x}(\text{TKE}/m) - \bar{v} \frac{\partial}{\partial y}(\text{TKE}/m) - \bar{w} \frac{\partial}{\partial z}(\text{TKE}/m),$$

$M$ : generación mecánica;  $B$ : generación convectiva;  $Tr$ : transporte inercial entre distintas escalas;  $\varepsilon = (\text{TKE})^{3/2}/\ell_\varepsilon$ , disipación viscosa con escala de disipación  $\ell_\varepsilon$ .

## 2. Turbulencia - transporte por turbulencia

- ▶ La covariancia entre la velocidad vertical ( $w$ ) y temperatura potencial ( $\theta$ ) permite estimar el flujo vertical de calor y las condiciones de estabilidad.

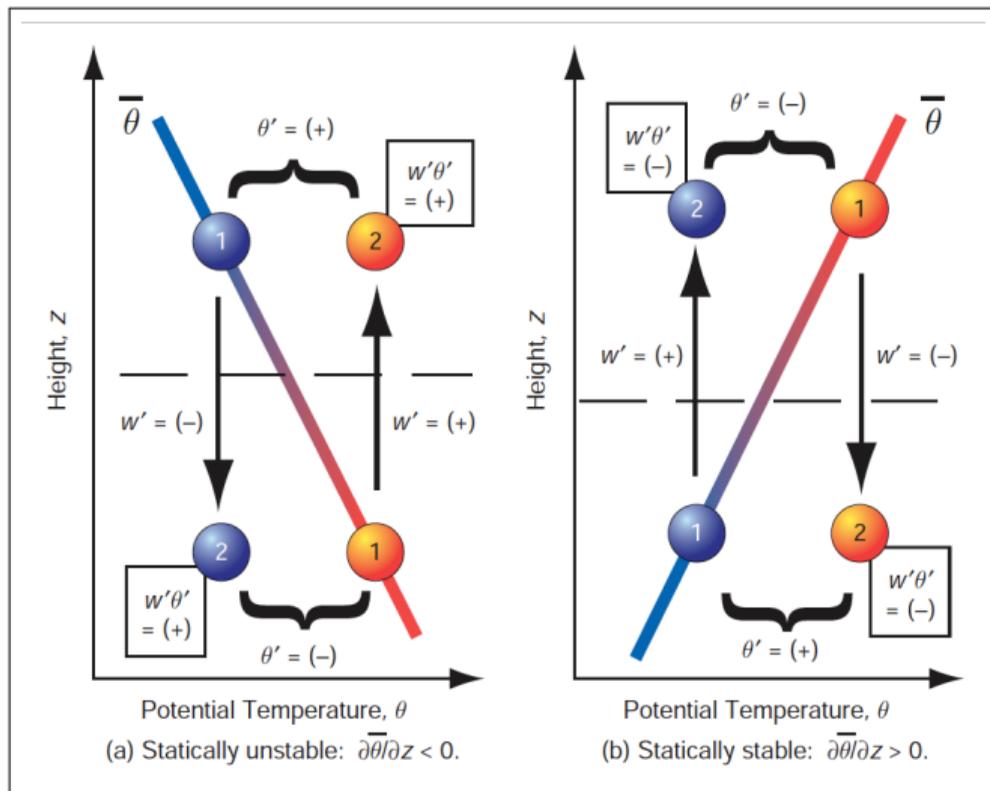
$$\text{cov}(w, \theta) = \overline{w' \theta'}.$$

- ▶ Transporte por convección: la temperatura potencial como parámetro de referencia. El flujo vertical de calor por turbulencia:

$$Q_H = \rho c_p \overline{w' \theta'} \Rightarrow \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' \theta'}}{\partial z},$$

- $\overline{w' \theta'} > 0 \Rightarrow$  flujo ascendente de calor;
- $\overline{w' \theta'} < 0 \Rightarrow$  flujo descendente de calor.

## 2. Turbulencia - estabilidad y temperatura potencia



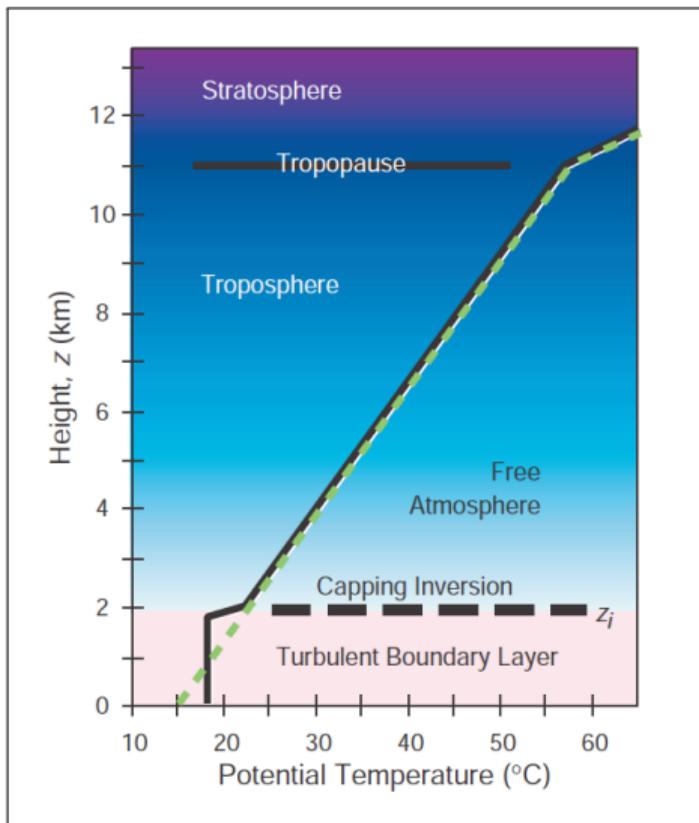
Capa estable: temperatura potencial  $\theta$  aumenta con la altura:

- Izquierda: aire sube adiabáticamente y queda con temperatura por encima de su alrededor; mantiene la tendencia a subir. Una masa descendiente mantiene la tendencia a bajar.

- Derecha: masa de aire sube adiabáticamente y queda con temperatura inferior a la de su alrededor; tiende a descender.

⇒ Estabilidad convectiva dada por  $\partial \theta' / \partial z$ .

### 3. Estructura vertical - temperatura

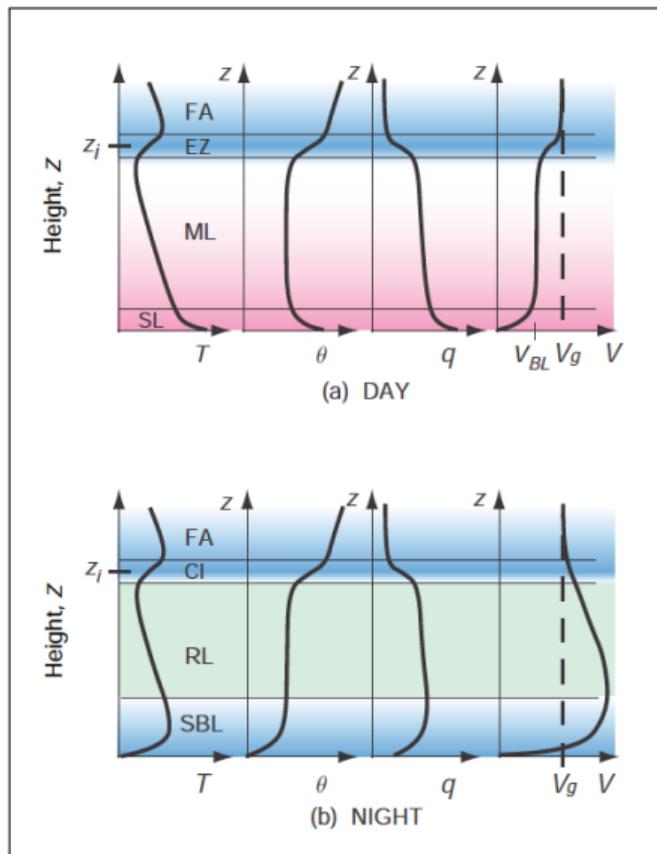


- ▶ La tropósfera tiene

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \Gamma_{ad} - \Gamma \simeq 3.3^{\circ} \text{ km}^{-1}.$$

- ▶ La capa límite es básicamente adiabática,  $\partial \theta / \partial z = 0$ .
- ▶ La capa de inversión tiene alta estabilidad,  $\partial \theta / \partial z > 0$ .
- ▶ Por encima de la capa de inversión, la atmósfera sigue un gradiente de temperatura  $dT/dz$  cercano al estándar  $\Rightarrow \partial \theta / \partial z > 0$ .

### 3. Estructura vertical - perfiles verticales; día - noche

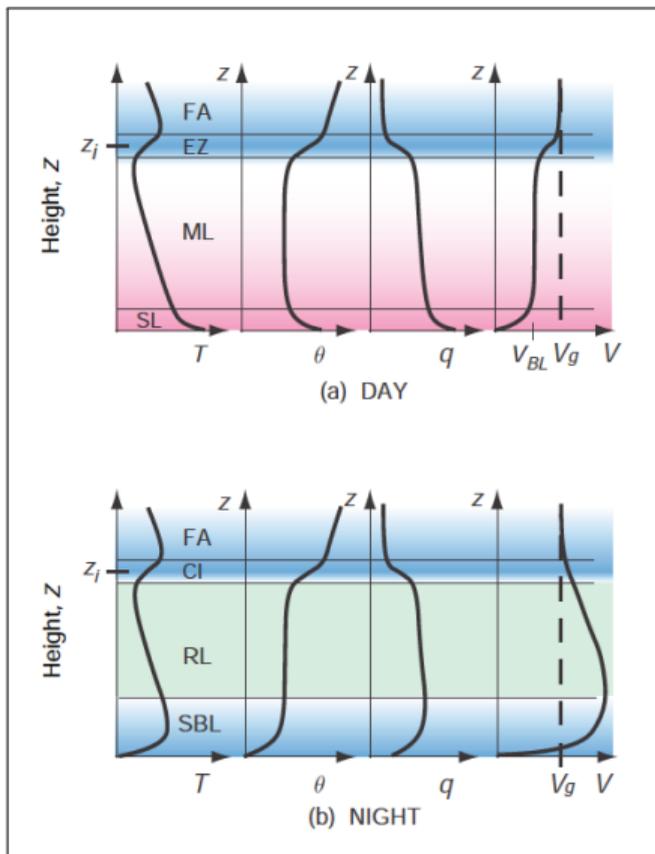


Perfiles de día y noche para temperatura ( $T$ ), temperatura potencial ( $\theta$ ), humedad específica ( $q$ ), viento ( $V$ ).

- ▶ Las regiones:
  - diurnas: capa superficial (SL, surface layer), capa de mezclado (ML, mixing layer), zona de arrastre (EZ, entrainment zone), atmósfera libre (FA, free atmosphere);
  - nocturnas: capa superficial estable (SBL, stable), capa residual (RL, residual), tapón de inversión (CI, capping inversion) y FA.

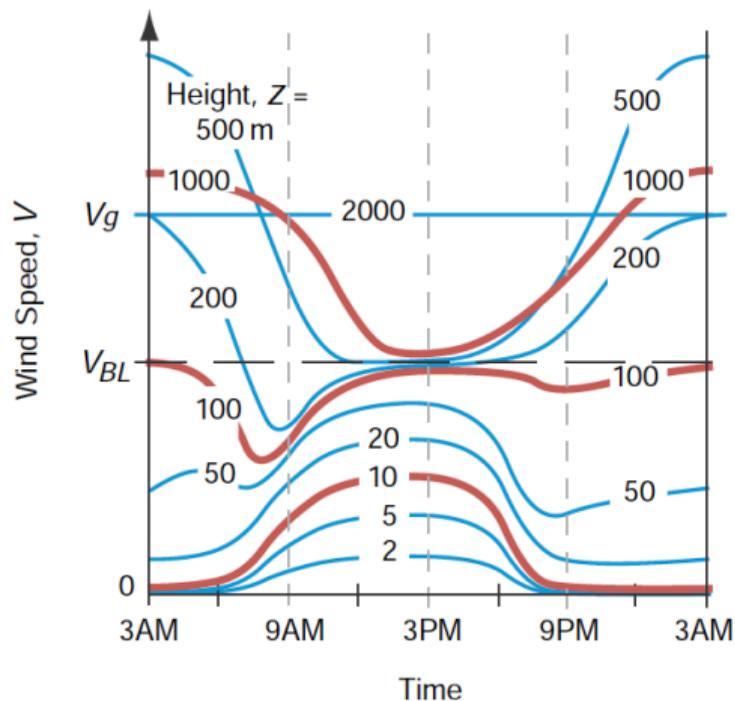
Fig. 9.16, W&H.

### 3. Estructura vertical - perfiles verticales; día - noche



- ▶ Humedad específica ( $q$ ):
  - en el día: evaporación en la superficie; humedad relativa retenida en la ML;
  - en la noche: condensación en la superficie.
- ▶ Viento ( $V$ ):
  - condición a la frontera: en la superficie,  $V(z = 0) = 0$ ;
  - en el día: viento inhibido por turbulencia  $\Rightarrow V < V_g$ .
  - en la noche: ausencia de fricción; la fuerza de Coriolis empuja al viento hacia  $V_g$ , con oscilaciones inerciales que dan  $V > V_g$  en ciertos niveles.

### 3. Estructura vertical - viento en capa límite



Esquema de las variaciones de la velocidad del viento a lo largo de día para varias alturas, indicadas por el número en la línea.

**Fig. 9.18** Sketch of variation of wind speed ( $V$ ) with local time on a sunny day over land, as might be measured at dif-

## 4. Balance de energía - el balance radiativo

- ▶ La superficie juega un papel primario en el balance energético terrestre.
- ▶ Flujo radiativo neto que llega a la superficie (suelo o mar) es,

$$F^* = F_s^\downarrow - F_s^\uparrow + F_t^\downarrow - F_t^\uparrow, \quad (3)$$

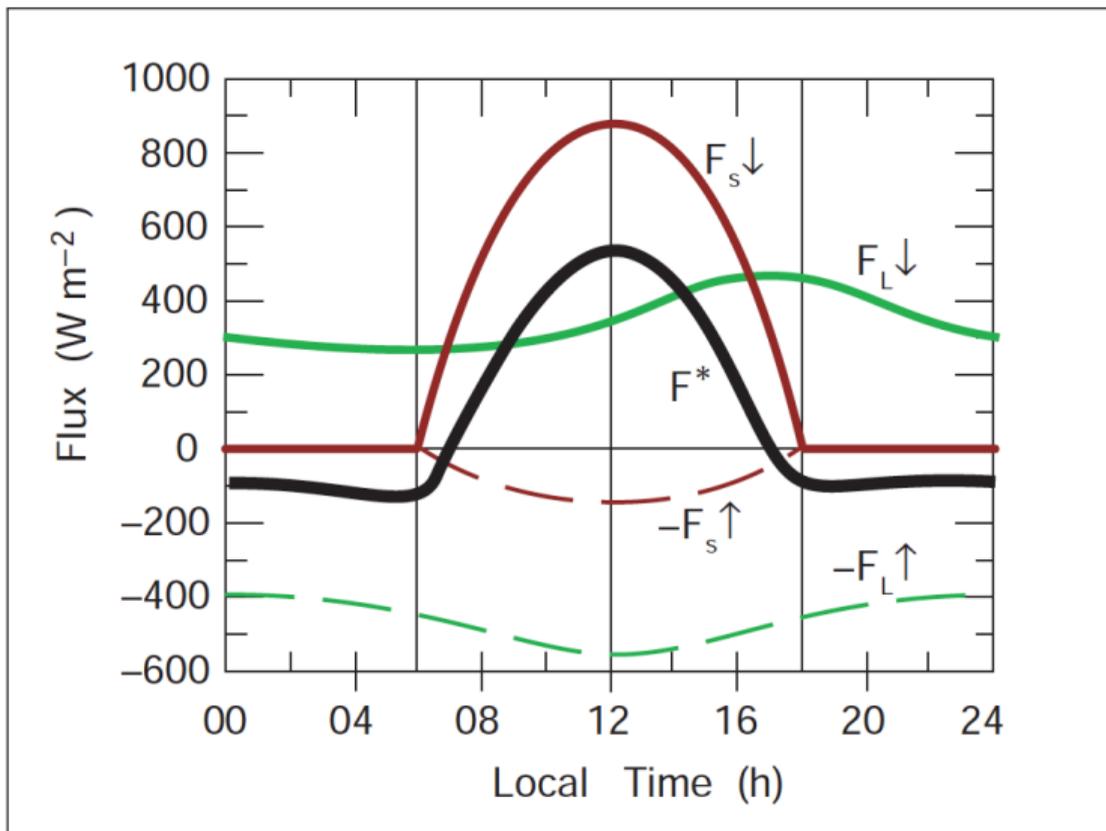
denotando  $s$  la radiación visible,  $t$  radiación térmica.

- ▶ El comportamiento de cada componente tiene un patrón nominal.

Bajo cielo claro y buen clima:

- $F_s^\downarrow$  radiación solar absorbida, modulada por la posición del Sol  $\propto \sin \theta_\odot(t)$ ;
  - $F_s^\uparrow$  sigue a  $F_s^\downarrow$ , pero con menor intensidad (albedo);
  - $F_t^\uparrow \propto \sigma T^4(t)$ , de acuerdo a la temperatura del aire;
  - $F_t^\downarrow$  en fase con  $F_t^\uparrow$ .
- ▶ Lo que determina el comportamiento de  $F^*$ .

## 4. Balance de energía - Variación diurna



- ▶  $F_s^\downarrow \propto \sin \theta_\odot(t)$ , modulación solar;
- ▶  $F_s^\uparrow$  sigue a  $F_s^\downarrow$ , menor intensidad;
- ▶  $F_t^\uparrow \propto \sigma T^4(t)$ , modulado por la temperatura del aire ( $F_L$  en la figura);
- ▶  $F_t^\downarrow$  en fase retrasada con  $F_t^\uparrow$ .

## 4. Balance de energía

- ▶ El flujo neto en la superficie,  $F^*$ , corresponde con un intercambio calor,

$$F^* = F_{Hs} + F_{Es} + F_{Gs}, \quad (4)$$

$F_{Hs}$  calor absorbido o liberado por el aire en entalpía (“sensible heat”);

$F_{Es}$  calor latente absorbido o liberado por aire húmedo mediante condensación o vaporización;

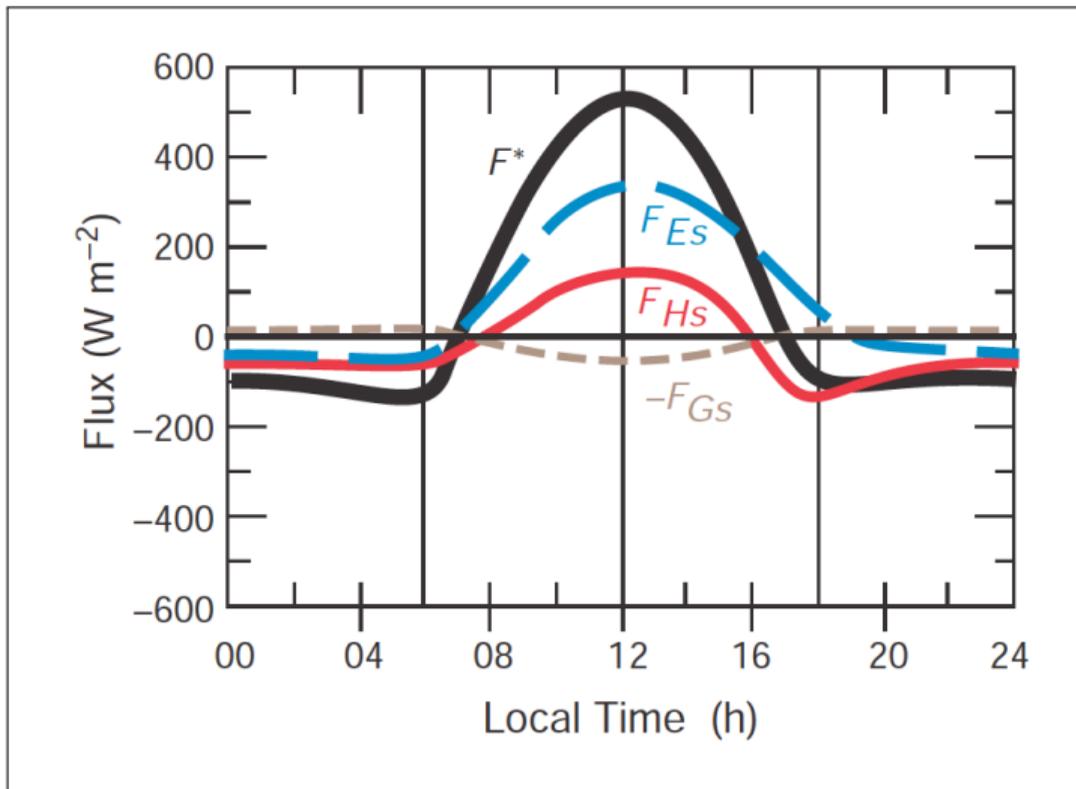
$F_{Gs}$  calor absorbido o liberado directamente por la superficie (conducción).

- ▶ El flujo neto ascendente está dado por,

$$F_{\text{neto}}^{\uparrow} = -F^* + F_{Hs} + F_{Es} = -F_{Gs}. \quad (5)$$

- ▶ El mar tiene mayor inercia térmica, por su mayor capacidad calorífica y masa  $\Rightarrow$   $F_{Gs}$  más importante sobre superficie marítima.

## 4. Balance energético en la superficie



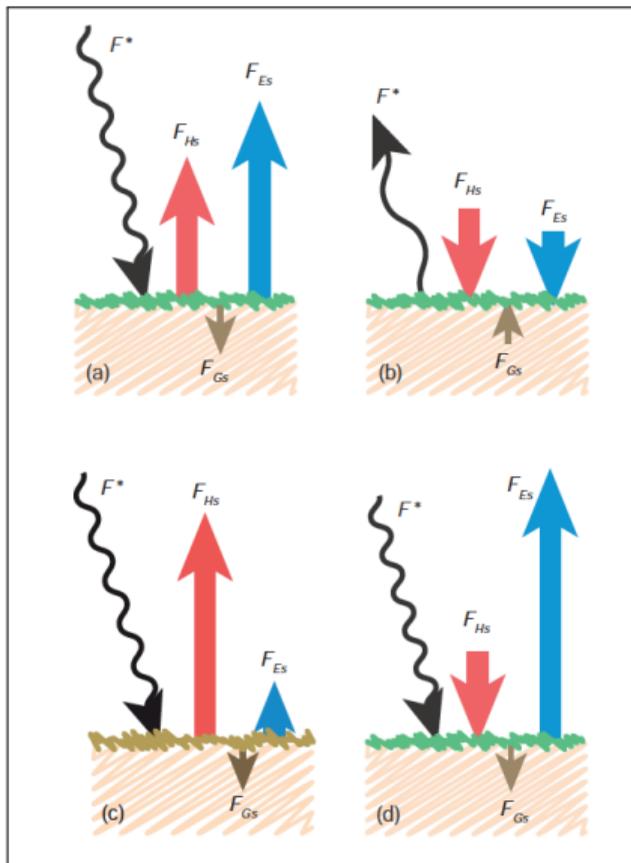
$$F^* = F_{Hs} + F_{Es} + F_{Gs}.$$

$F_{Hs}$ : calor absorbido o liberado por el aire ("sensible heat");

$F_{Es}$ : calor latente absorbido o liberado por el aire húmedo mediante condensación o vaporización;

$F_{Gs}$ : calor absorbido o liberado directamente por la superficie (conducción).

## 4. Balance de energía - intercambio energético en superficie



- Día en superficie con vegetación: la mayor parte de la radiación solar se traduce en evaporación;
- de noche en superficie con vegetación: el flujo neto emergente es térmico de la superficie;
- día en superficie árida: la mayor parte de la radiación calienta el aire, aumentando su entalpía (poca humedad  $\rightarrow$  poco calor latente);
- día en superficie con vegetación: se da el efecto oasis cuando el aire contribuye a calentar la superficie y el flujo ascendente es únicamente calor latente.

## 4. Balance de energía - flujo de energía emergente, a nivel global

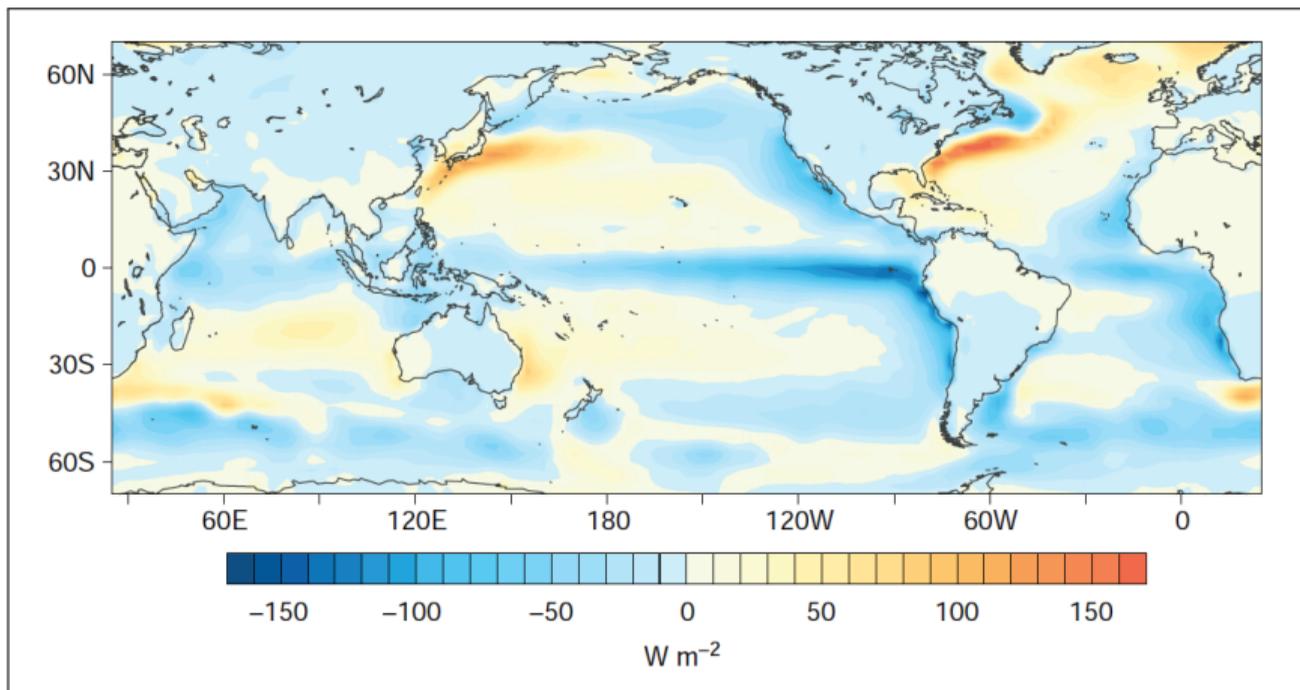
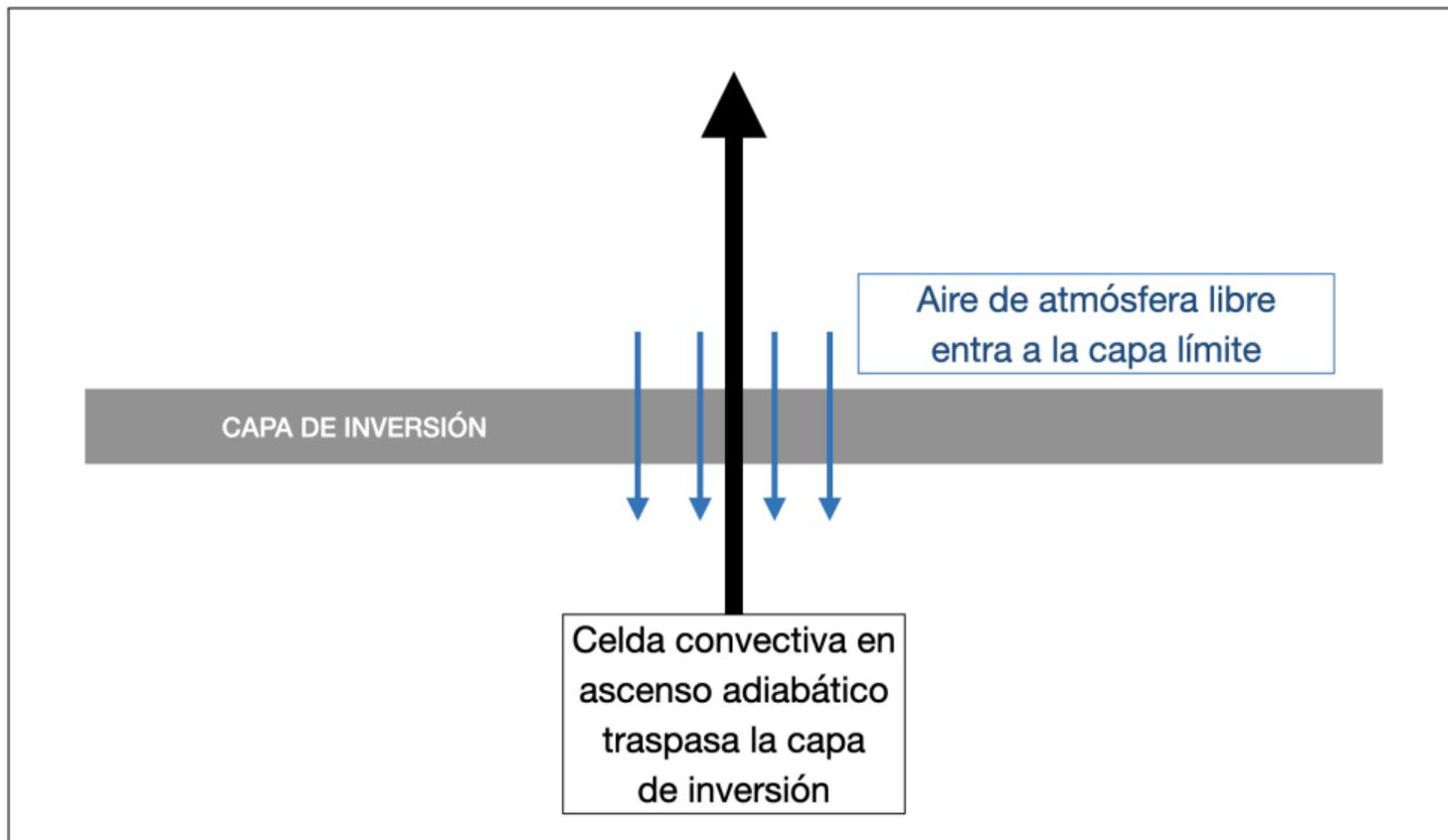


Figura 1: Flujo emergente,  $F_{\text{neto}}^{\uparrow} = -F^* + F_{Hs} + F_{Es}$ , promediado a lo largo del año. El flujo promedio es cercano a cero, pero con desviaciones  $\pm 100 \text{ W/m}^2$  (W&H fig. 9.14).

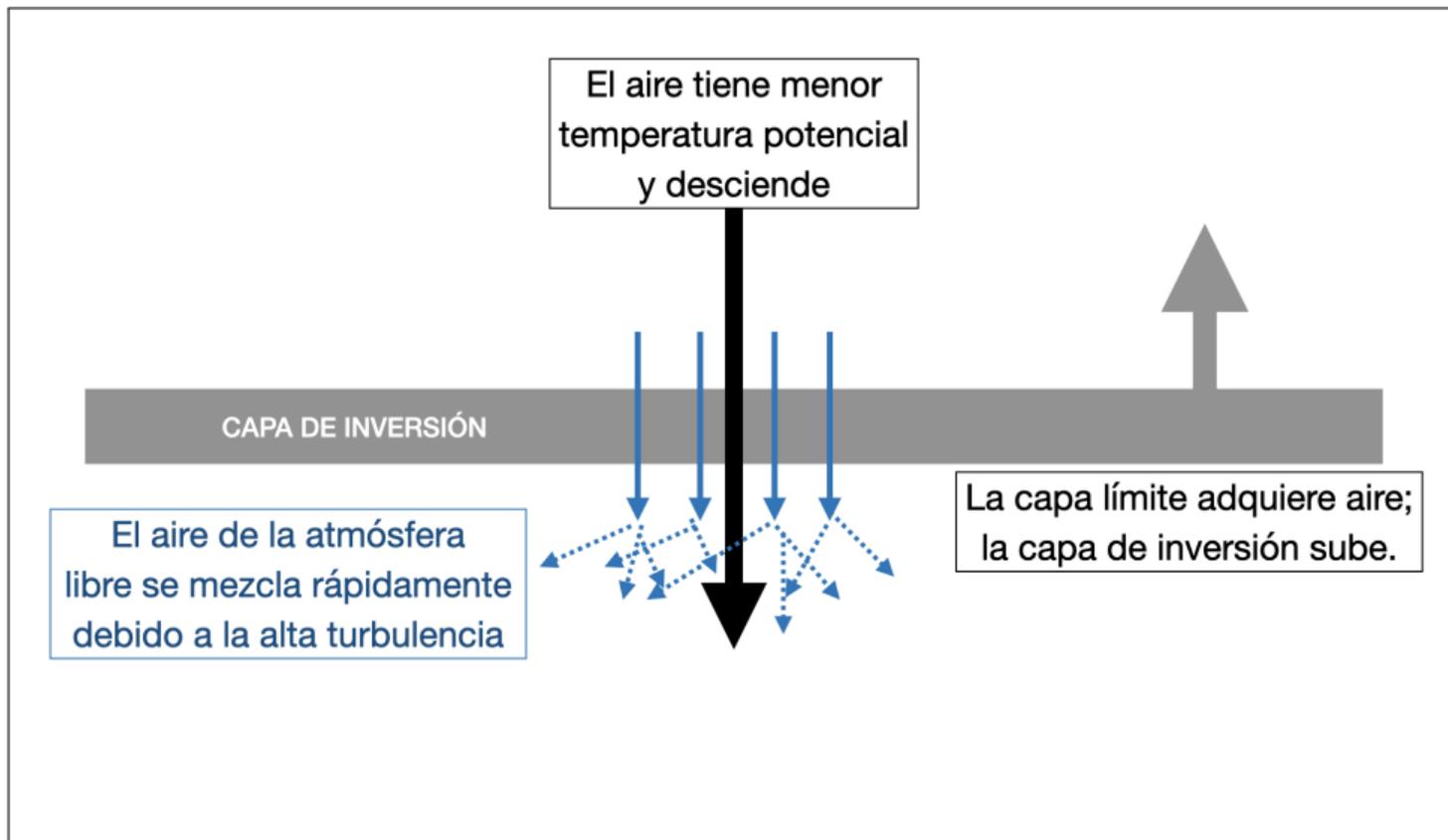
## 5. Evolución - evolución de la capa límite

- ▶ La capa límite evoluciona siguiendo el ciclo día-noche.
- ▶ Mayor turbulencia de día; capa residual de noche.
- ▶ Su evolución depende del comportamiento de la capa de inversión, la cual tiende a ser más pronunciada y subir de día; descender y atenuarse de noche.

## 5. Evolución - arrastre (entrainment)



## 5. Evolución - arrastre (entrainment)



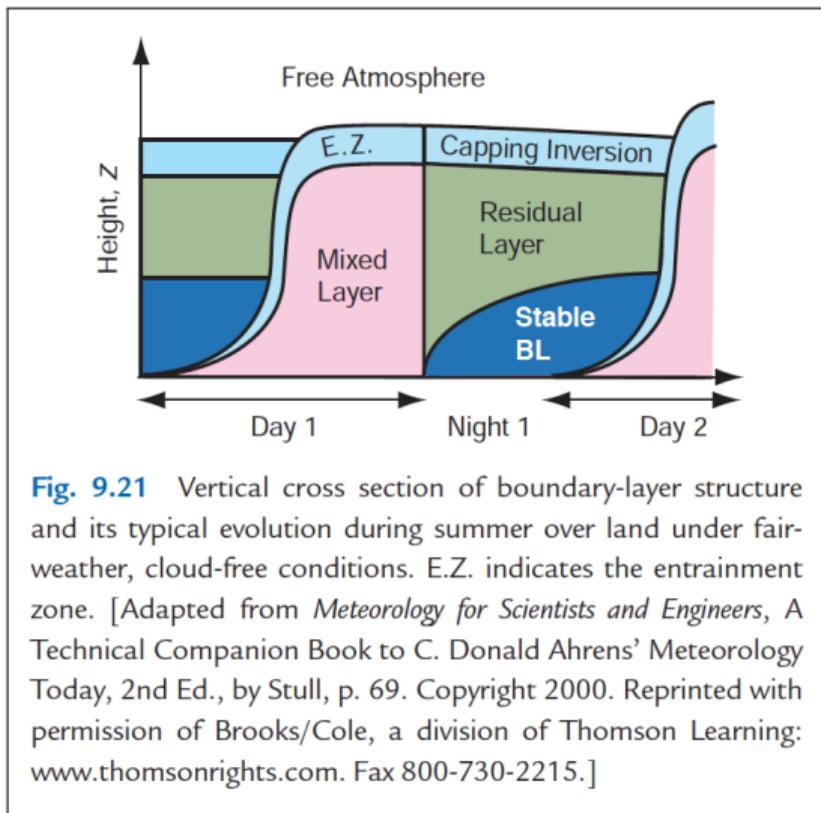
## 5. Evolución - crecimiento

- ▶ La capa de inversión crece a una tasa,

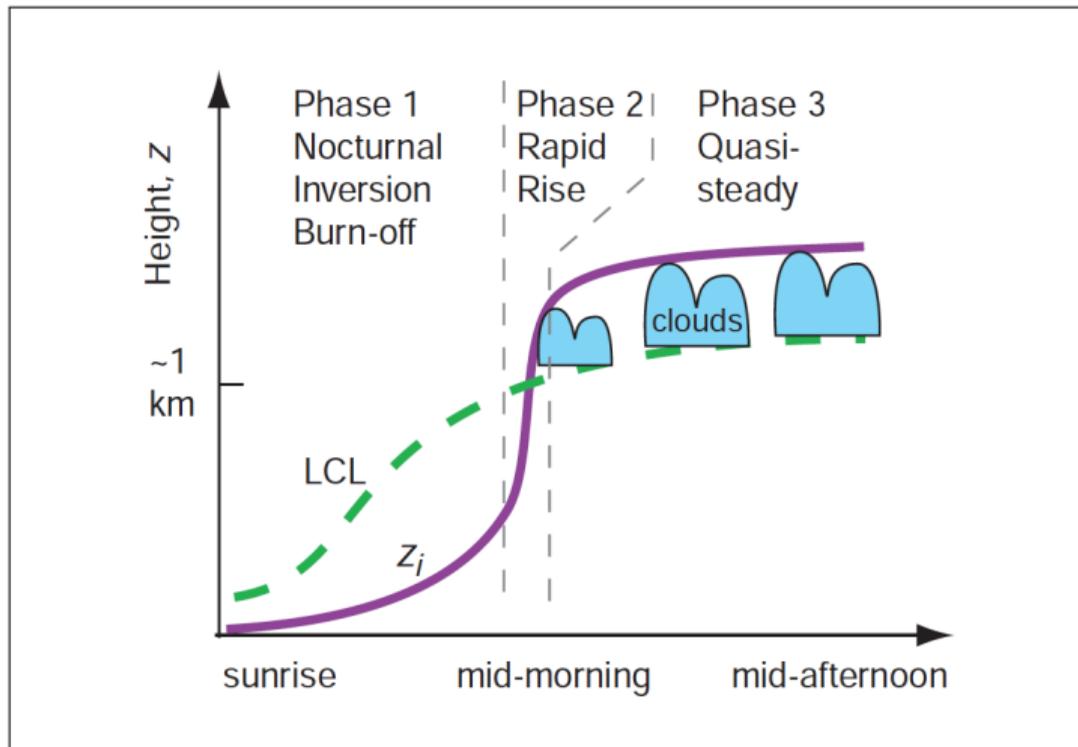
$$\frac{dz_i}{dt} = w_e + w_i.$$

- ▶  $w_e$  es la velocidad de ascenso de la capa límite por arrastre ( $\geq 0$ ), que se escala con la presencia de turbulencia, i.e. convección.
- ▶  $w_i$  es la velocidad vertical neta del flujo turbulento. Cumple  $w_i = -z_i \left( \nabla \cdot \vec{V} \right)$ , con  $\nabla \cdot \vec{V}$  el promedio de la divergencia horizontal de  $\vec{V}$  en la capa límite.
  - $\nabla \cdot \vec{V} > 0 \Rightarrow$  configuración  $[\leftarrow \cdot \rightarrow] \Rightarrow$  la capa límite disminuye;
  - $\nabla \cdot \vec{V} < 0 \Rightarrow$  configuración  $[\rightarrow \cdot \leftarrow] \Rightarrow$  la capa límite aumenta.

## 5. Evolución - día, noche



## 5. Evolución - nubes en la capa límite



- ▶ Se forman nubes dentro de la capa límite cuando el “lifting condensation level” queda por debajo de la capa de inversión.
- ▶ El LCL es la altura en la que una parcela no saturada conteniendo vapor de agua subiendo de manera adiabática alcanza el nivel de saturación.

## 6. Efectos de superficie - capa límite marítima; tormentas

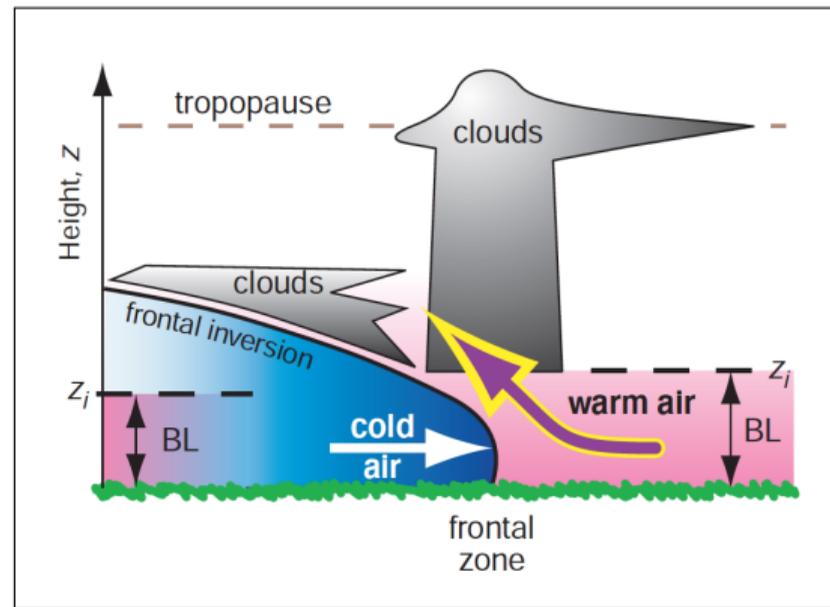
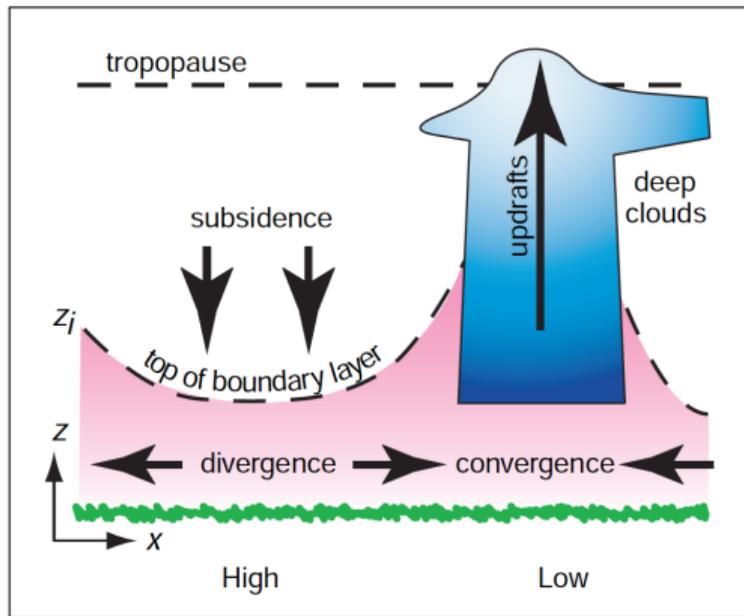
### ▶ Capa límite sobre superficie marítima

- influenciada por mayor humedad relativa  $\Rightarrow$  mayor cobertura de nubes; procesos radiativos IR más importantes;
- La presencia de llovizna es relevante en el balance térmico.
- Ciclo día - noche menos marcado.

### ▶ Tormentas

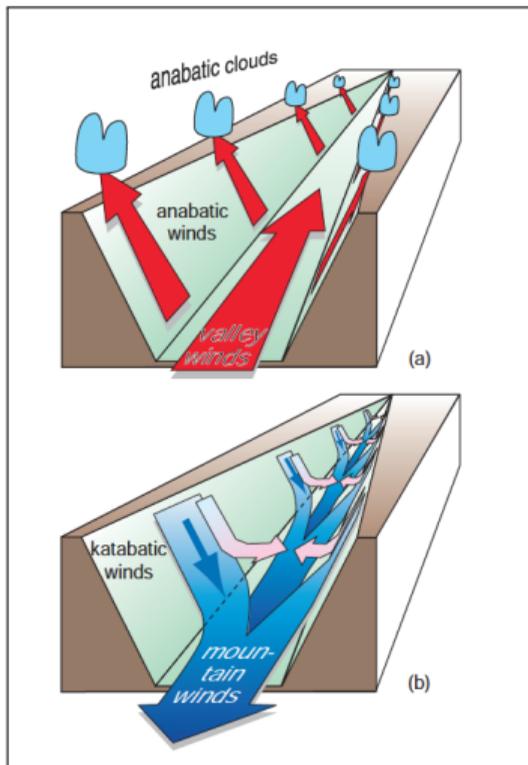
- En regiones con ascenso de aire (ciclones y frentes) y en nubes con alta convección, la capa intermedia sube al punto en que la tropopausa pasa a ser la capa de inversión.
- Situación propicia para la dispersión de contaminantes en la atmósfera alta.

## 6. Efectos de superficie - capa límite marítima; tormentas



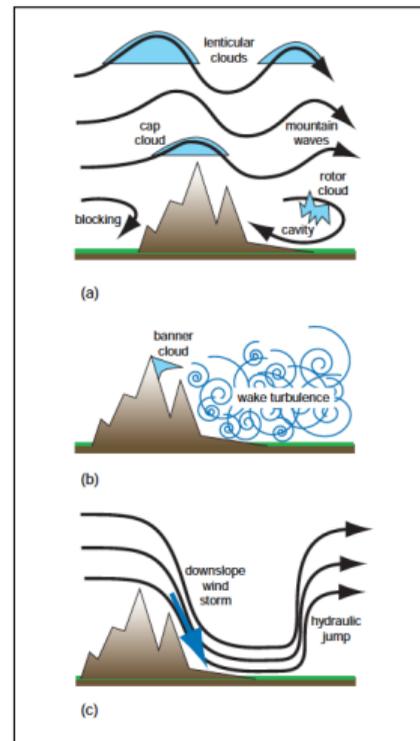
*Izquierda:* Distorsión de la capa límite en presencia de clima tormentoso, con la tropopausa fungiendo como capa de inversión. *Derecha:* al término de la tormenta, el frente de nubes toma el papel de capa de inversión.

## 6. Efectos de superficie - efectos de terreno



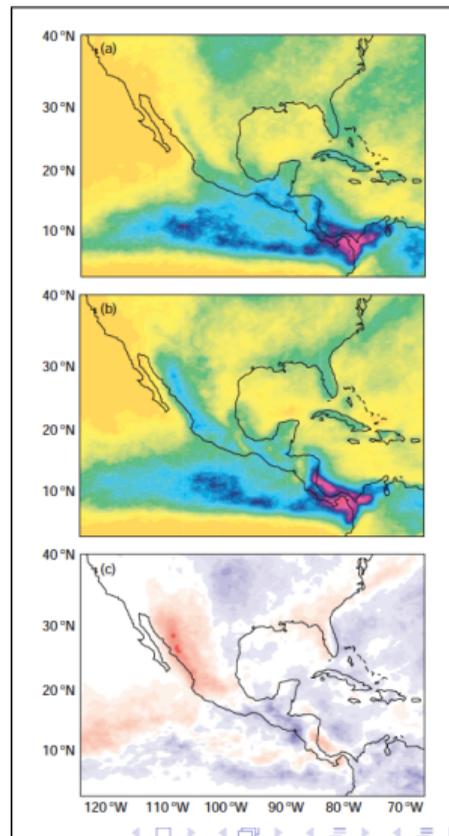
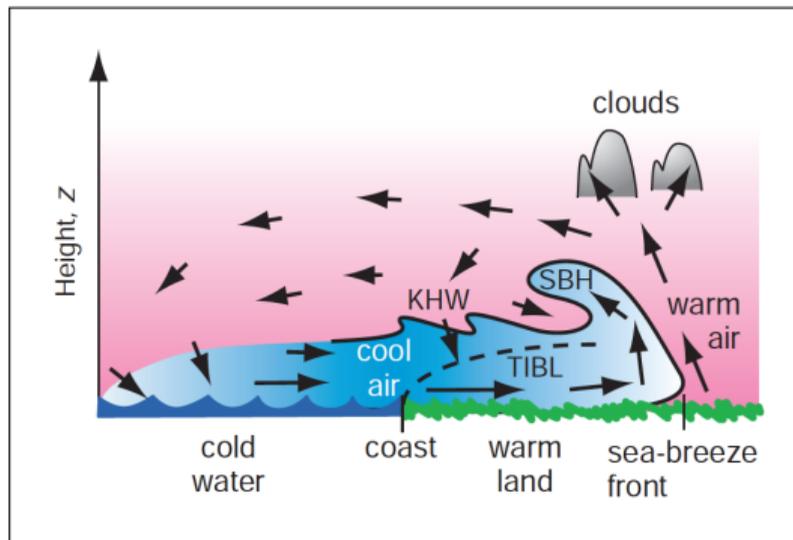
### Efectos del terreno

- ▶ Pendientes
  - ⇒ vientos anabáticos, y nubes anabáticas;
  - vientos katabáticos, con neblina.
- ▶ Montañas
  - ⇒ nubes lenticulares, turbulencia, saltos de presión.

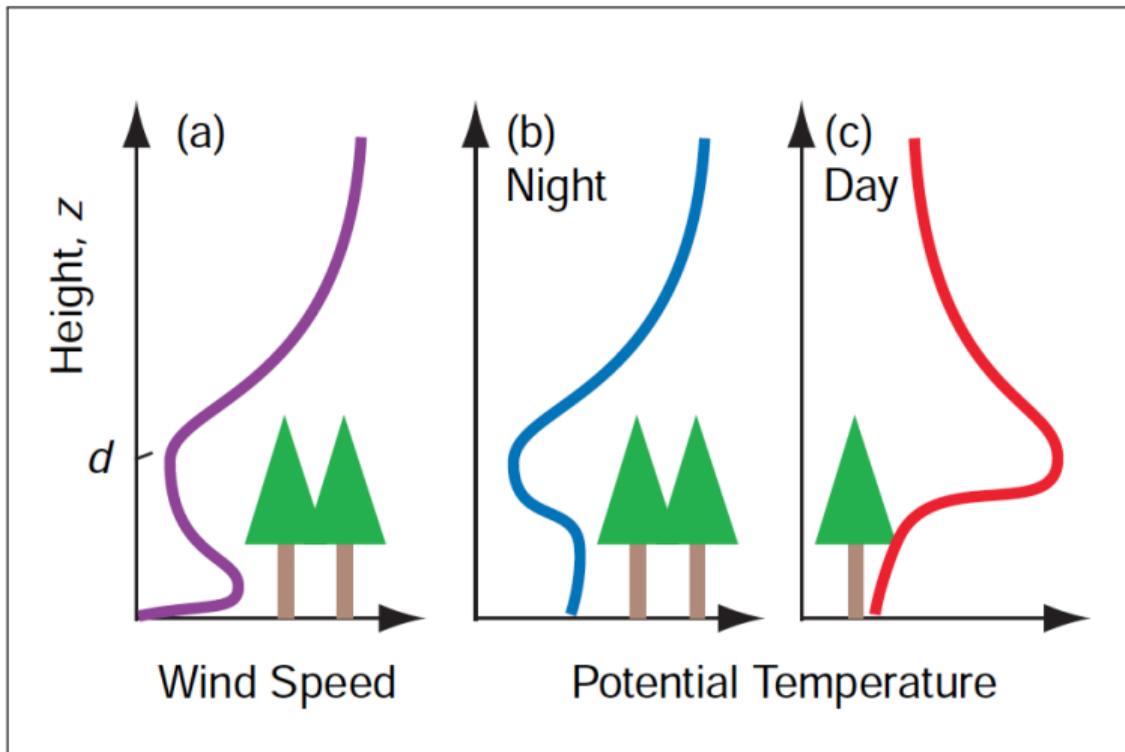


## 6. Efectos de superficie - brisa marítima

- ▶ Respuestas distintas de superficie terrestre y cuerpos de agua.
- ▶ Se pueden superponer a efectos de terreno.



## 6. Efectos de superficie - bosques y selvas

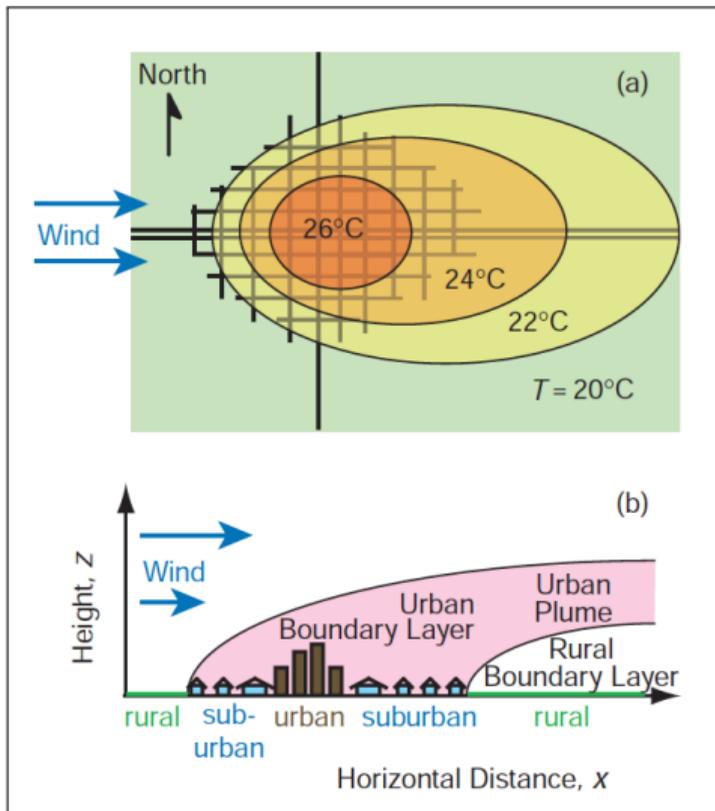


### Bosques y selvas

Efecto de fricción del follaje sobre el viento.

⇒ estabilidad.

## 6. Efectos de superficie - islas urbanas



### Islas urbanas

Edificios  $\Rightarrow$  fricción sobre el viento;  
menor humedad superficial;  
contaminación;  
fuerte producción urbana de calor....