

Taller de preparación — Del Sol a los alisios

Ejercicios para estudiar para el parcial · Energía, invernadero, circulación y tiempo · No calificable

Octubre de 2026

Constantes útiles

Constante	Valor
Constante de Stefan–Boltzmann, σ	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Constante solar a 1 UA, S_0	1361 W m^{-2}
Luminosidad del Sol, $L_\odot$	$3,83 \times 10^{26} \text{ W}$
1 unidad astronómica (UA)	$1,496 \times 10^{11} \text{ m}$
Radio de la Tierra, a	6371 km
Velocidad angular de la Tierra, Ω	$7,29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Gravedad, g	$9,81 \text{ m s}^{-2}$
Ley de Wien	$\lambda_{\text{max}} = 2898 \mu\text{m K} / T$
Gradiente adiabático seco, Γ_d	$9,8 \text{ K km}^{-1}$
Altura del nivel de condensación por ascenso	$\approx 125 \text{ m} \times (T - T_d)$
Calor latente de condensación, L	$2,5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$
Clausius–Clapeyron	$\approx 7 \text{ \% más vapor de saturación por cada K}$

Bloque A · Energía

Ejercicio 1. La esfera de Dyson

En 1960 el físico británico Freeman Dyson propuso que una civilización avanzada terminaría rodeando su estrella con una cáscara para capturar toda su energía. Su argumento para encontrarla era puramente energético: esa energía tiene que salir otra vez al espacio, y saldría como radiación infrarroja (Dyson, 1960, *Science*, 131, 1667–1668).

Suponga una cáscara delgada, negra y muy buena conductora del calor (toda a la misma temperatura), de radio 1 UA, centrada en el Sol.

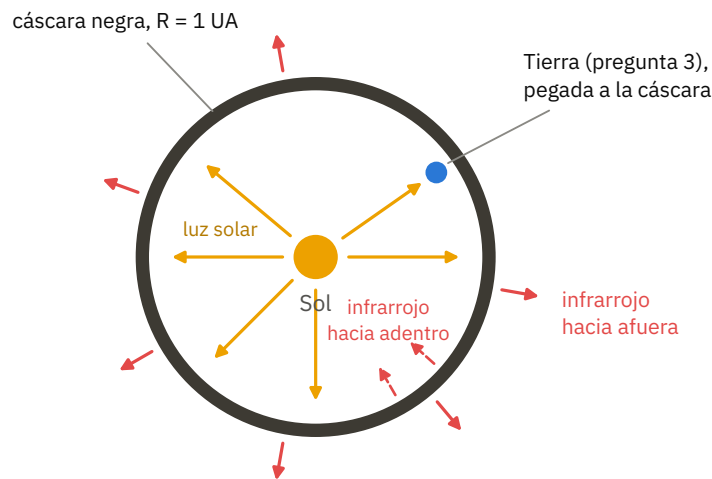


Figura 1. Esquema de la cáscara de Dyson. Las flechas amarillas son luz solar; las rojas, radiación infrarroja de la cáscara.

1. Calcule la temperatura de la cáscara en equilibrio. La cara interna también emite: explique por qué esa emisión no entra en el balance de la cáscara completa.
2. ¿En qué longitud de onda emite más? Compare con el Sol y con la Tierra. ¿Por qué Dyson propuso buscar en el infrarrojo y no en el visible?
3. Ahora la Tierra (albedo 0,3) está dentro de la cáscara, pegada a ella. Suponga que la cáscara queda apenas por fuera de la órbita: la Tierra sigue prácticamente a 1 UA del Sol y la cáscara sigue a la temperatura del punto 1. Recibe luz solar directa y, además, la radiación infrarroja que la cara interna emite en todas las direcciones. Plantee el balance de la Tierra y calcule su temperatura. ¿Qué tiene en común esta situación con el modelo de una capa del efecto invernadero, y en qué se diferencia?
4. Usted es la ingeniera de la civilización. ¿A qué radio debe construir la cáscara para que la Tierra quede a 288 K? ¿Cuánto material extra necesita respecto a la cáscara de 1 UA?
5. Un astrónomo observa una estrella cuyo brillo visible cayó 20 % en tres años y que muestra un exceso infrarrojo con máximo cerca de $9 \mu\text{m}$. Hay dos hipótesis: un enjambre parcial de Dyson o un disco de polvo tibio. Proponga dos observaciones que distingan entre ellas y diga qué esperaría ver en cada caso.

Ejercicio 2. El mundo de margaritas

James Lovelock, químico británico, y Andrew Watson imaginaron un planeta cubierto de margaritas blancas y negras para mostrar que la vida puede regular el clima (Watson y Lovelock, 1983, *Tellus B*, 35, 284–289). Use esta versión:

Superficie	Albedo	Fracción hoy
Margaritas blancas	0,70	20 %
Margaritas negras	0,15	20 %
Suelo desnudo	0,35	60 %

La estrella da 1361 W m^{-2} y el efecto invernadero del planeta es fijo: la superficie está 33 K por encima de la temperatura de emisión.

1. Calcule el albedo planetario y la temperatura de superficie.
2. La estrella se vuelve 10 % más brillante. Si las margaritas no cambian, ¿cuánto se calienta el planeta?

3. Si las negras se quedan en 20 %, ¿qué fracción de blancas devuelve la temperatura inicial?
4. Las margaritas negras están localmente más calientes que el promedio y las blancas más frías. Ambas crecen mejor cerca de 22 °C. Explique por qué esto produce una retroalimentación negativa. Compare con la retroalimentación hielo–albedo del modelo de bola de nieve del curso: ¿cuál es el signo de dA/dT en cada caso?
5. Nombre un mecanismo real del sistema climático que actúe como las margaritas y otro que actúe al revés. Para cada uno diga en qué escala de tiempo opera.

Ejercicio 3. « La banda del CO₂ ya está saturada »

Un columnista escribe: «El CO₂ ya absorbe toda la radiación de 15 μm en los primeros metros de atmósfera. Añadir más no puede calentar nada.» Usted tiene que responderle con física.

Use un modelo simple: la Tierra emite al espacio desde una altura efectiva z_e , donde la temperatura es $T(z_e) = T_s - \Gamma z_e$, con $T_s = 288 \text{ K}$, $\Gamma = 6,5 \text{ K km}^{-1}$ y temperatura de emisión 255 K.

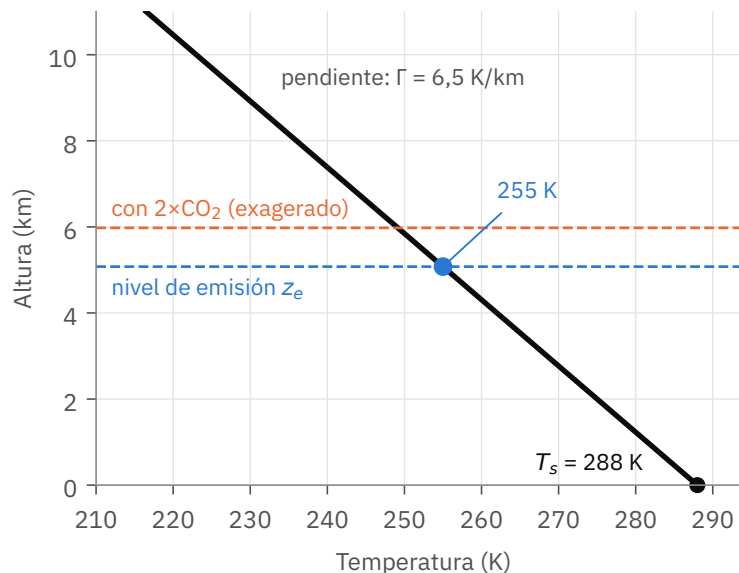


Figura 3. Perfil de temperatura del modelo y nivel efectivo de emisión al espacio.

1. Calcule z_e . Al duplicar el CO₂, z_e sube unos 150 m. Calcule el déficit de energía inicial en el tope (W m^{-2}) y cuánto debe calentarse la superficie para recuperar el equilibrio, sin retroalimentaciones.
2. Repita el razonamiento para una atmósfera isoterma ($\Gamma = 0$) y para una capa donde la temperatura aumenta con la altura. ¿Qué le pasa a la estratosfera cuando aumenta el CO₂?
3. Si el calentamiento observado viniera de un Sol más brillante, ¿qué se esperaría en la estratosfera? Explique por qué esa observación sirve como huella para distinguir las causas.
4. Con la fórmula $\Delta F = 5,35 \ln(C/C_0) \text{ W m}^{-2}$, calcule el forzamiento de 280 a 420 ppm y de 420 a 560 ppm. ¿Por qué el mismo aumento de 140 ppm da menos forzamiento la segunda vez? ¿Llega alguna vez a cero? Relacione la respuesta con las alas de la banda de absorción.
5. Escriba la respuesta al columnista en cinco líneas, sin ecuaciones, para un lector de periódico.

Bloque B • Física de los fenómenos

Ejercicio 4. Viaje de una parcela del Pacífico a Cali

Una parcela sale de Buenaventura (nivel del mar) con 27 °C y punto de rocío de 24 °C, empujada por viento del oeste de 5 m s⁻¹. Sube por la Cordillera Occidental hasta 2000 m y baja al valle del Cauca, a Cali (1000 m). Use $\Gamma_m = 5 \text{ K km}^{-1}$ para el ascenso saturado y suponga que el punto de rocío de una parcela no saturada baja 1,8 K por km.

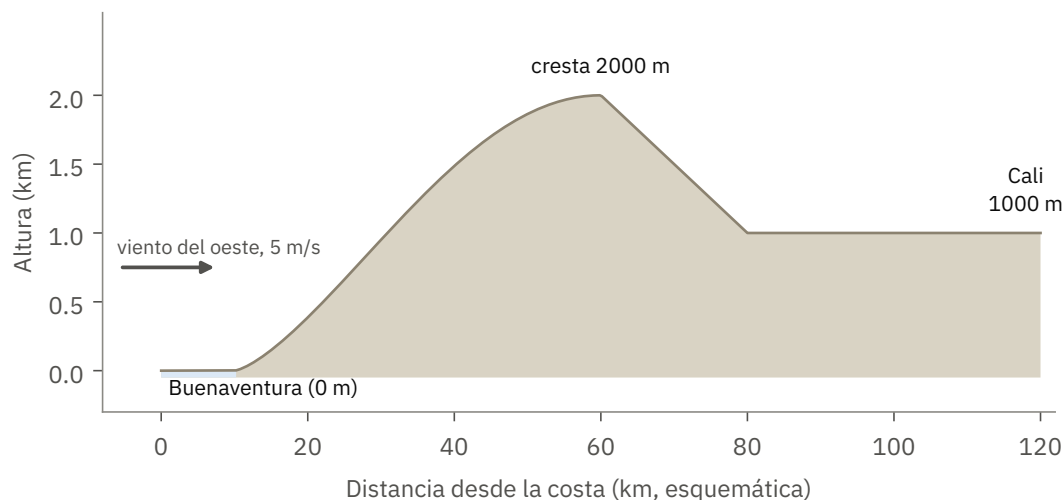


Figura 4. Corte esquemático de la costa a Cali. Calcule usted las temperaturas de la parcela en cada tramo.

1. Calcule la altura de la base de la nube y la temperatura allí.
2. Calcule la temperatura de la parcela en la cresta.
3. Toda el agua condensada llueve en la ladera de barlovento. Calcule temperatura, punto de rocío y humedad relativa al llegar a Cali. Compare con el caso en que la nube no llueve y se evapora al bajar. ¿De dónde sale la diferencia de temperatura?
4. La razón de mezcla es 18,9 g/kg en Buenaventura y 13,8 g/kg (saturación) en la cresta. Una capa de 1 km de espesor (densidad 1,1 kg m⁻³) cruza la costa a 5 m s⁻¹ y pierde esa agua sobre 50 km de ladera. Estime la lluvia en mm por día y en mm por año. En la costa del Pacífico caen entre 6000 y más de 10 000 mm al año: ¿su estimación es alta o baja, y por qué?
5. El cañón del río Dagua, entre la costa y Cali, tiene bosque seco y cactus a pocos kilómetros de una de las selvas más lluviosas del mundo. Proponga dos mecanismos que lo expliquen y un dato que permitiría distinguir entre ellos.

Ejercicio 6. El sondeo de la mañana y la tormenta de la tarde

Sondeo de las 6 a. m. en una estación del piedemonte llanero a 500 m. El punto de rocío en superficie es 20 °C.

Altura (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
T (°C)	22,0	23,5	20,5	17,0	11,5	5,5	-1,0	-8,0	-22,5	-38,0	-53,0	-66,0

Para el ascenso saturado use $\Gamma_m = 4,5 \text{ K km}^{-1}$ por debajo de 4 km, 5,5 entre 4 y 6 km, 6,5 entre 6 y 8 km y 8,0 por encima de 8 km. El punto de rocío de una parcela que sube sin saturarse baja 1,8 K por km.

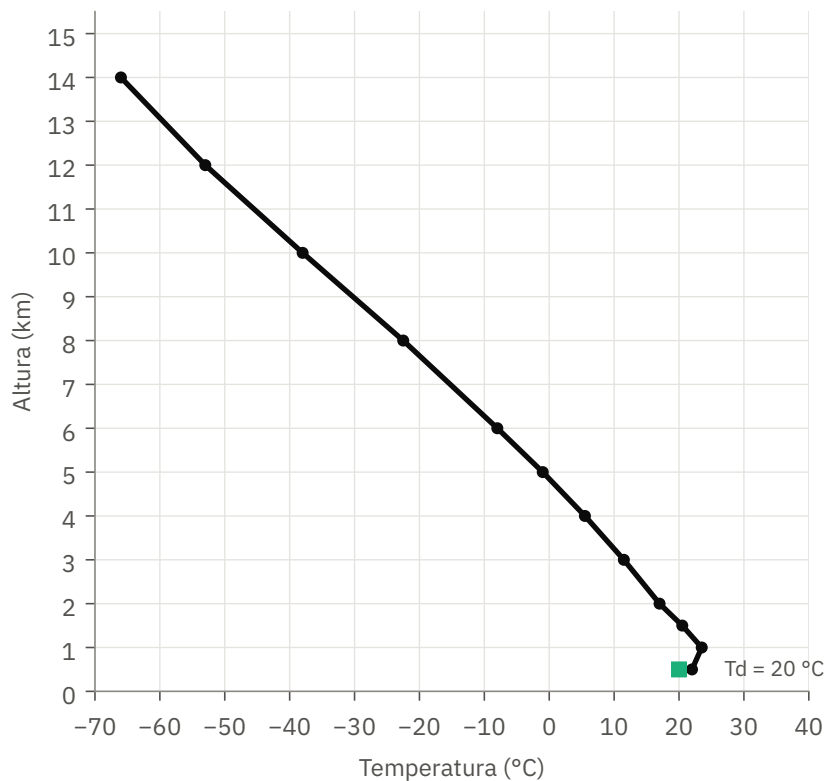


Figura 6. Sondeo de las 6 a. m. Dibuje sobre esta gráfica la parcela, la línea de punto de rocío y el área de la CAPE.

1. Dibuje el perfil. ¿Dónde está la inversión y qué la produjo?
2. Suba una parcela de superficie a las 6 a. m. ¿Por qué no hay tormentas a esa hora?
3. Encuentre el nivel de condensación convectiva (donde la línea de punto de rocío de la parcela corta el perfil) y la temperatura convectiva: la temperatura de superficie que hace falta para que las térmicas lleguen solas a ese nivel.
4. Cuando se alcanza esa temperatura, suba la parcela saturada desde el nivel de condensación. Encuentre el nivel de equilibrio y estime la CAPE sumando $g(T_p - T_e) / T_e \times \Delta z$ capa por capa. Con $w = \sqrt{2 \text{ CAPE}}$, estime la velocidad máxima de la corriente ascendente y diga por qué las reales son menores.
5. Hay dos pronósticos para la tarde: (A) cielo despejado y máxima de 33 °C; (B) estratos persistentes y máxima de 28 °C. ¿En cuál espera tormentas y a qué hora? En el caso B, ¿qué mecanismo del piedemonte podría disparar convección de todos modos?

Ejercicio 7. ¿Por qué casi no llegan huracanes a Colombia?

En noviembre de 2020 el huracán Iota pasó por Providencia (13° N) como categoría 5. En la Colombia continental, entre 1° y 12° N, los huracanes son muy raros.

1. Calcule el parámetro de Coriolis f a 5°, 13° y 20° N. Explique con f por qué un ciclón casi no puede formarse ni mantenerse muy cerca del ecuador.
2. La intensidad potencial máxima puede aproximarse como

$$V^2 \approx \frac{C_k}{C_d} \frac{T_s - T_o}{T_o} \Delta k$$

con $C_k/C_d = 0,9$, temperatura del mar $T_s = 302$ K, temperatura de salida $T_o = 200$ K y desequilibrio de entalpía $\Delta k = 15$ kJ kg⁻¹. Calcule V . Si el mar se calienta 1 K y Δk crece 7 %, ¿cuánto cambia V ?

- 2020 fue año de La Niña. Explique, con la cizalladura del viento, por qué los años Niña suelen tener temporadas más activas en el Caribe y los años Niño más tranquilas.
- Una tormenta está en 13° N, 75° W, moviéndose al oeste. Describa qué tendría que pasar con el anticiclón subtropical y con los vientos del oeste para que girara hacia el sur, hacia la costa colombiana, y por qué es poco probable.

Bloque C · Interpretación de evidencia

Ejercicio 9. ¿El Niño garantiza sequía?

Tabla *ilustrativa* de 45 años: fase de ENSO en diciembre–febrero contra la lluvia de esos meses en la región Andina, clasificada en terciles (cada tercil es un tercio de los años por construcción).

Fase	Bajo lo normal	Normal	Sobre lo normal	Total
El Niño	9	4	1	14
Neutro	5	7	5	17
La Niña	1	4	9	14
Total	15	15	15	45

- Calcule la probabilidad de lluvia bajo lo normal dado El Niño y la de lluvia sobre lo normal dada La Niña. Compárelas con la probabilidad sin información.
- Si ENSO no tuviera ningún efecto, ¿qué tan probable sería ver 9 o más años secos en 14 años Niño? ¿Qué concluye?
- Un titular dice: «El Niño significa sequía segura en Colombia». Corríjalo con un número de la tabla.
- Hubo un año Niño con lluvia sobre lo normal. Proponga dos explicaciones físicas, cada una basada en algo visto en el curso, y diga cómo comprobaría cada una.
- Alguien propone repetir la tabla para cada una de las 30 subregiones del país. ¿Qué problema estadístico aparece? ¿Qué subregiones esperaría que mostraran la señal más fuerte, y por qué?

Ejercicio 10. Lo normal, lo raro y la tendencia

Parte A. Lluvia de octubre en una estación durante 30 años (mm, ordenados, datos *ilustrativos*):

95 · 118 · 132 · 140 · 151 · 158 · 163 · 170 · 176 · 182 · 189 · 196 · 203 · 210 · 216 · 224 · 231 · 240 · 248 · 257 · 268 · 279 · 292 · 305 · 322 · 343 · 371 · 410 · 468 · 575

Este octubre llovieron 147 mm, y un noticiero dice: «Llovió 40 % menos que el promedio: una sequía histórica».

- Calcule la media y la mediana. ¿Por qué son distintas?
- ¿En qué percentil cae este octubre? ¿Cada cuántos años ocurre algo así?
- Reescriba la frase del noticiero para que sea correcta.

Parte B. La temperatura media anual de una ciudad sube 0,25 °C por década y su variabilidad de un año a otro tiene desviación estándar de 0,3 °C.

4. El error estándar de una tendencia lineal ajustada a n años de datos independientes es $\sigma \sqrt{12 / (n(n^2 - 1))}$. ¿Cuántos años hacen falta para que la tendencia sea al menos dos veces su error estándar?
5. Los años no son independientes: El Niño y La Niña duran más de un año. ¿Eso aumenta o disminuye el número de años necesario?
6. Un concejal dice: «Este fue el año más frío de los últimos ocho; el calentamiento se detuvo». Responda comparando el calentamiento esperado en ocho años con el ruido de un año, y diga qué fase de ENSO sospecharía.
7. En el curso vimos que dos algoritmos dan 60 % o 85 % como la fracción de lluvia de los sistemas convectivos. ¿Qué tienen en común ese caso y el del noticiero?

Bloque D • Toma de decisiones

Ejercicio 11. El embalse y El Niño

Es octubre. Usted opera un embalse hidroeléctrico andino que está al 60 %. El pronóstico oficial da 70 % de probabilidad de El Niño en diciembre–febrero. Tiene dos opciones: generar fuerte ahora, cuando el precio de la energía es bueno (A), o guardar agua (B). Resultados en unidades monetarias, valores *ilustrativos*:

Opción	Si llega El Niño	Si no llega
A. Generar ahora	−80 (embalse al 20 % en marzo, hay que comprar energía cara)	+30
B. Guardar agua	+10	−15 (se vierte agua en las lluvias de abril–mayo)

1. Calcule el valor esperado de cada opción con la probabilidad del pronóstico.
2. Encuentre la probabilidad de El Niño a partir de la cual conviene guardar agua. En promedio hay un Niño cada cuatro o cinco años: ¿qué le dice eso sobre la decisión en un año sin pronóstico?
3. Construya la tabla de arrepentimiento (cuánto pierde cada opción frente a la mejor en cada escenario). ¿Qué opción minimiza el arrepentimiento máximo? ¿Cuándo preferiría ese criterio al valor esperado? Recuerde el racionamiento de 1992–1993 en Colombia.
4. El mismo 70 % emitido en abril vale menos que emitido en octubre. Explique por qué con la barrera de predictibilidad de primavera y con el oscilador de recarga.
5. Escriba en cuatro líneas la recomendación para la junta directiva, incluyendo qué señal le haría cambiar de decisión en noviembre.

Ejercicio 12. ¿Evacuar o no evacuar?

Un municipio de montaña tiene un sistema de alerta por avenidas torrenciales que emite una probabilidad para la noche siguiente. Evacuar cuesta $C = 100$ y una avenida sin evacuación causa pérdidas evitables de $L = 1000$ (unidades *ilustrativas*, sin contar vidas). Registro de 590 noches con alerta:

Probabilidad pronosticada	Noches	Noches con avenida
5 %	400	12
20 %	120	30
40 %	50	18
70 %	20	15

1. Muestre que conviene evacuar cuando la probabilidad supera C/L . ¿Cuál es el umbral aquí?
2. ¿El sistema es confiable? Compare cada probabilidad pronosticada con la frecuencia observada.
3. Calcule el costo total de cuatro políticas en esas 590 noches: nunca evacuar, evacuar siempre, evacuar si $p \geq 20\%$ y evacuar si $p \geq 70\%$.
4. Con la mejor política, ¿cuántas falsas alarmas hubo? ¿Qué riesgo crea eso con el tiempo y cómo lo manejaría?
5. Las pérdidas reales incluyen vidas (en Mocoa, en 2017, una avenida torrencial nocturna causó más de 300 muertes). ¿Cómo cambia eso el umbral? ¿Debería la decisión ponerle un precio a la vida? Argumente su posición en un párrafo.

Ejercicio 13. Diseñar el drenaje para la lluvia de 2060

Una alcantarilla urbana en el valle de Aburrá se diseñó para la tormenta de una hora con periodo de retorno de 25 años: 60 mm/h. Va a durar 50 años, y para 2060 se espera un calentamiento local de 2°C . El caudal de diseño es proporcional a la intensidad (método racional, $Q = C i A$).

1. Calcule la intensidad de diseño para 2060 con la escala de Clausius–Clapeyron (7 % por K) y con una escala «super-Clausius–Clapeyron» de 14 % por K.
2. Explique con física por qué la lluvia convectiva de corta duración podría crecer más rápido que 7 % por K, y por qué la lluvia media global crece mucho menos (alrededor de 2 % por K).
3. Tres opciones (valores ilustrativos): (A) diseñar para 60 mm/h, costo 100; (B) para la intensidad de Clausius–Clapeyron, costo 115; (C) para la super-Clausius–Clapeyron, costo 140. Cada falla cuesta 40. En 50 años se esperan 4,5, 2,8 y 2,0 fallas con A, B y C si el clima se calienta como se prevé, y 2,0, 1,2 y 0,8 si el clima no cambiara. Calcule el costo total de cada opción en cada escenario. Elija con el valor esperado (80 % de probabilidad de calentamiento) y con el mínimo arrepentimiento máximo. ¿Coinciden?
4. Proponga una cuarta opción de diseño adaptativo que no sea simplemente «más grande».
5. El periodo de retorno de 25 años supone un clima estacionario. ¿Qué significa «25 años» cuando la distribución de lluvias se está moviendo?

Ejercicio 14. El presupuesto de carbono como problema de diseño

En 2025 el mundo emite unas 42 Gt de CO_2 al año y el calentamiento es de $1,3^\circ\text{C}$. Use una respuesta efectiva (incluye los otros gases) de $0,6^\circ\text{C}$ por cada 1000 Gt de CO_2 acumulado.

1. Calcule el presupuesto restante para $1,5^\circ\text{C}$ y para 2°C .
2. ¿En cuántos años se agota cada uno si las emisiones siguen constantes?
3. Si las emisiones bajan en línea recta hasta cero, ¿en qué año debe llegarse a cero para no pasar de $1,5^\circ\text{C}$? ¿Y de 2°C ?

4. Calcule el calentamiento máximo si el cero neto llega en 2050 y si llega en 2070.
5. Un país que emite el 0,5 % del total dice que su esfuerzo no cambia nada. Calcule cuánto calentamiento evitaría llegando a cero hoy en vez de en 2050. Discuta el argumento: ¿es correcto el número y es correcta la conclusión?
6. La respuesta al CO₂ tiene incertidumbre: su rango probable va de 0,27 a 0,63 °C por 1000 Gt. ¿Cambia eso la decisión o solo la fecha?

Bloque E · Pensamiento creativo

Ejercicio 15. El mundo que no existe

Elija **una** de las tres opciones. En las dos primeras no hay respuesta única: se califica que cada predicción salga de un mecanismo visto en el curso y que pueda ponerse a prueba.

Opción A. Colombia sin Andes. Imagine que la cordillera desaparece y el norte de Suramérica es una llanura a 200 m.

1. Haga cuatro predicciones sobre el clima del país: lluvia en el Pacífico, temperatura en lo que hoy es Bogotá, el chorro de bajo nivel al oriente de los Andes y el ciclo anual de lluvias en el centro del país. Para cada una, nombre el mecanismo.
2. ¿Cuál de sus predicciones es la más incierta y por qué?
3. Dibuje un mapa esquemático de la lluvia anual en ese mundo, con flechas para los vientos dominantes.
4. Describa un experimento con un modelo climático que permitiera comprobar sus predicciones: qué cambiaría, qué dejaría igual y qué compararía.

Opción B. La Tierra gira al revés. Mismo planeta, misma órbita, misma geografía, pero la rotación es de este a oeste.

1. ¿De dónde soplan los alisios? ¿Dónde estaría la piscina cálida del Pacífico y dónde la lengua fría?
2. ¿Cómo sería el clima de la costa pacífica colombiana? ¿Y el de La Guajira?
3. ¿Existiría algo parecido a ENSO? Razone con la retroalimentación de Bjerknes.
4. ¿Qué no cambiaría? Nombre al menos dos rasgos del clima que dependen solo de la energía y no del sentido de giro.

Opción C. Diseñe un experimento. Hipótesis: «*Las tormentas de la tarde en el valle de Aburrá nacen sobre las laderas por la brisa de valle y después se mueven hacia el centro del valle*». Tiene presupuesto para seis estaciones automáticas, un radiosondeo diario durante dos meses y acceso al radar meteorológico local.

1. ¿Dónde pondría las estaciones y qué mediría cada una? Justifique cada sitio.
2. ¿A qué hora lanzaría el radiosondeo y por qué?
3. ¿Qué resultado concreto refutaría la hipótesis?
4. Nombre un factor que podría producir el mismo patrón por otra razón y cómo lo separaría.
5. ¿En qué meses haría la campaña y por qué?

Ejercicio 16. Tres planetas, tres invernaderos

Planeta	Flujo solar (W m^{-2})	Albedo	Temperatura media de superficie (K)
Venus	2601	0,77	737
Tierra	1361	0,30	288
Marte	586	0,25	210

1. Calcule la temperatura de emisión de cada planeta. ¿Cuál es la más baja? Explique por qué eso no contradice que Venus esté más cerca del Sol.
2. En un modelo de N capas opacas al infrarrojo, $T_s = T_e (N + 1)^{1/4}$. ¿Cuántas «capas» equivalentes tiene cada planeta? Interprete un valor de N menor que 1.
3. Venus refleja el 77 % de la luz y aun así tiene la superficie más caliente del sistema solar. Explique cómo conviven las dos cosas.
4. Marte tiene más CO_2 por metro cuadrado que la Tierra y casi no tiene efecto invernadero. Proponga dos razones físicas.

Ejercicio 18. El glaciar que se queda sin montaña

Girardot (300 m) tiene 28 °C de temperatura media y Bogotá (2600 m), 14 °C. Un nevado cónico tiene la cumbre a 5300 m y hoy mantiene glaciar por encima de 4900 m, la línea donde lo que se acumula iguala lo que se derrite.

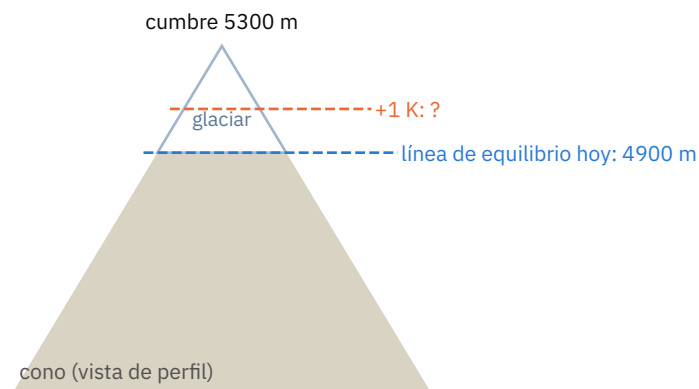


Figura 18. Nevado cónico con la línea de equilibrio actual del glaciar.

1. Calcule el gradiente vertical de temperatura entre Girardot y Bogotá. Compárelo con el seco y con el saturado: ¿qué dice sobre la atmósfera tropical?
2. Con ese gradiente, ¿cuánto sube la línea de equilibrio del glaciar por cada grado de calentamiento?
3. En un cono, el área por encima de una altura z es proporcional a $(\text{cumbre} - z)^2$. Calcule la fracción del glaciar que se pierde con +0,5 K y con +1 K.
4. Explique por qué los glaciares tropicales pequeños son mucho más sensibles que los grandes, y por qué en el trópico no hay «invierno» que los recupere.

5. Un alcalde dice que la ciudad se quedará sin agua cuando desaparezca el glaciar. ¿Qué dato pediría antes de aceptar o rechazar esa frase? ¿Qué papel tiene el páramo?

B · Física de los fenómenos

Ejercicio 19. El reloj de El Niño

En la termoclina del Pacífico ecuatorial, la diferencia de densidad entre la capa cálida y el agua de abajo es de 0,3 % y la capa cálida tiene unos 150 m de espesor. El océano mide unos 15 000 km de oeste a este.

1. Con $g' = g \Delta\rho/\rho$, calcule la velocidad de una onda de Kelvin, $c = \sqrt{g'H}$, y cuánto tarda en cruzar el Pacífico.
2. Las ondas de Rossby largas viajan hacia el oeste a un tercio de esa velocidad. ¿Cuánto tarda la respuesta en ir al oeste, reflejarse y volver como Kelvin?
3. En enero, una ráfaga de viento del oeste sobre el Pacífico occidental hunde la termoclina. ¿Cuándo esperaría ver agua más cálida frente a Tumaco? ¿Qué le diría a la flota pesquera?
4. Con los tiempos de 1 y 2, explique por qué ENSO tiene un periodo de años y no de meses. ¿Qué elemento del oscilador de recarga no aparece en este cálculo?

Ejercicio 21. Un río atmosférico contra la cordillera

Un río atmosférico tiene, entre 1000 y 700 hPa, humedad específica media de 10 g/kg y viento de 20 m s⁻¹. El transporte integrado de vapor es $IVT = (1/g) \int q V dp$.

1. Calcule el IVT en kg m⁻¹ s⁻¹.
2. La escala de Ralph et al. (2019) clasifica los ríos atmosféricos por su IVT máximo (250–500 débil, 500–750 moderado, 750–1000 fuerte, 1000–1250 extremo, más de 1250 excepcional) y sube o baja una categoría si dura más de 48 h o menos de 24 h. Clasifique este evento si dura 36 h y si dura 60 h.
3. Llega perpendicular a una cordillera y el 60 % del vapor se convierte en lluvia sobre una franja de 100 km de ancho. Estime la lluvia en mm/h y el total en 24 h.
4. Los mismos 600 kg m⁻¹ s⁻¹ pueden ser una bendición o un desastre. ¿De qué depende? Nombre tres factores.
5. Compare un río atmosférico con los «ríos voladores» de la Amazonía vistos en el curso: ¿en qué se parecen físicamente y en qué se diferencian?

Ejercicio 22. Un frente frío que llega al Caribe

Un frente frío avanza por el golfo de México a 10 m s⁻¹. Detrás, el aire es 10 K más frío, y la transición ocurre en 50 km.

1. ¿A qué ritmo baja la temperatura en una estación cuando pasa el frente?
2. Sobre el mar cálido, el agua le entrega al aire frío unos 300 W m⁻² de calor sensible y latente, repartidos en una capa de 1 km ($\rho = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$, $c_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Si todo ese calor calentara el aire, ¿en cuántas horas borraría el contraste de 10 K? ¿Qué distancia recorre el frente en ese tiempo?
3. Con ese resultado, explique por qué a la costa colombiana los frentes llegan sobre todo como viento fuerte y oleaje, y casi nunca como aire frío.

4. Dibuje el frente en un corte vertical. Marque dónde se forman las nubes y por qué el aire cálido sube sobre el frío y no al revés.

C · Interpretación de evidencia

Ejercicio 24. Cuatro ciclos anuales sin nombre

Lluvia media mensual (mm) de cuatro estaciones colombianas. Los datos son *ilustrativos* pero parecidos a las climatologías reales. Las estaciones son Bogotá, Riohacha, Villavicencio y Quibdó, en desorden.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
W	35	45	75	110	105	55	40	45	70	135	115	65
X	5	3	10	40	85	60	45	70	120	190	110	30
Y	30	75	170	420	520	470	400	360	330	380	290	110
Z	560	470	530	610	680	650	640	660	620	600	640	620

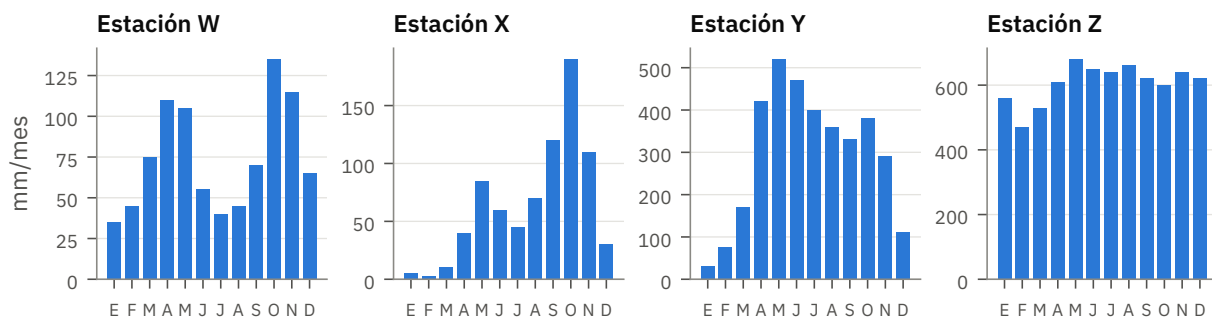


Figura 24. Lluvia media mensual de las cuatro estaciones de la tabla.

1. Asigne cada estación a su ciudad. Justifique cada asignación con un mecanismo, no con un recuerdo.
2. A $4,6^\circ$ N el Sol pasa por el cenit a comienzos de abril y a comienzos de septiembre. Compare esas fechas con los máximos de W. ¿Por qué hay un retraso?
3. X tiene un mínimo relativo en junio y julio. ¿Qué mecanismo del curso lo explica?
4. Y tiene un solo pico largo y Z casi no tiene estaciones. Explique cada caso.
5. Defina un índice numérico de estacionalidad, calcúlelo para las cuatro y ordénelas. ¿El orden coincide con su intuición?

D · Toma de decisiones

Ejercicio 26. Un seguro de lluvia para caficultores

Una aseguradora quiere vender un seguro paramétrico a caficultores del Huila: si la lluvia del mes crítico en la estación de referencia queda por debajo de un umbral, paga 1000 a cada asegurado, sin visitar la finca. Use como serie histórica los 30 valores del ejercicio 10.

1. Elija el umbral para que el seguro pague, en promedio, uno de cada diez años. ¿Cuántos de los 30 años habrían pagado?

- Calcule la prima justa (el pago esperado por año) y la prima comercial si la aseguradora cobra 20 % adicional.
- Una finca está a 15 km de la estación. En los 30 años la finca tuvo sequía en 4, el seguro pagó en 3 y ambas cosas coincidieron en 2 (datos *ilustrativos*). Calcule qué fracción de las sequías de la finca quedó sin pago y qué fracción de los pagos llegó sin sequía. Explique el riesgo de base.
- En septiembre se anuncia un Niño fuerte. Muchos caficultores quieren comprar el seguro justo entonces. ¿Qué problema tiene la aseguradora y cómo diseñaría la venta para evitarlo?
- Proponga dos cambios al índice que reduzcan el riesgo de base y diga qué dato del curso usaría en cada uno.

Ejercicio 27. Hidroelectricidad, sol y ENSO

En Colombia cerca de dos tercios de la electricidad es hidráulica. Generación relativa a un año normal (valores *ilustrativos*):

Fuente	El Niño	Neutro	La Niña
Hidráulica	0,75	1,00	1,15
Solar	1,08	1,00	0,94
Probabilidad de la fase	0,25	0,50	0,25

Hay racionamiento si la generación total cae por debajo de 0,85 de lo normal.

- Explique con física por qué la hidroelectricidad y la solar responden en sentido opuesto a ENSO en Colombia.
- Para portafolios con 10 %, 30 % y 50 % de solar, calcule la generación en cada fase y la generación esperada. ¿En cuáles hay racionamiento?
- Encuentre la fracción mínima de solar que evita el racionamiento en un año Niño.
- Los embalses guardan agua y los paneles no guardan sol. ¿Cómo cambia eso su análisis? ¿Qué papel podrían cumplir los embalses en un sistema con mucha solar?
- Antes de recomendar viento en La Guajira como tercera fuente, ¿qué pregunta sobre su relación con ENSO y con la estación seca necesitaría responder, y con qué datos?

E · Pensamiento creativo

Ejercicio 28. Un planeta para una enana roja

Una estrella tiene el 2 % de la luminosidad del Sol, el 25 % de su masa y una temperatura superficial de 3200 K. Usted debe diseñar un planeta parecido a la Tierra (albedo 0,3) que reciba el mismo flujo que nosotros.

- ¿A qué distancia debe orbitar? Con la tercera ley de Kepler ($P^2 = a^3/M$, con P en años, a en UA y M en masas solares), calcule su año en días.
- A esa distancia el planeta queda en rotación sincrónica: siempre muestra la misma cara a la estrella. ¿Cuánto dura su día? Con lo visto sobre Coriolis y la celda de Hadley, describa la circulación: ¿dónde sube el aire, dónde baja, dónde llueve?

3. Sin atmósfera que transporte calor, calcule la temperatura media del lado diurno (absorbe en un disco y emite solo por medio hemisferio) y la del punto subestelar. ¿Qué pasaría con el agua en el lado nocturno?
4. ¿En qué longitud de onda emite más la estrella? El hielo y el vapor de agua absorben mucho en el infrarrojo cercano. ¿La retroalimentación hielo–albedo sería más fuerte o más débil que en la Tierra?
5. Dibuje un mapa del clima del planeta y marque dónde construiría una ciudad. Justifique con tres argumentos físicos.

Tercera serie

Ejercicios sobre tres temas: la celda de Hadley con el ciclo anual de lluvias, los huracanes y los frentes.

Celda de Hadley y ciclo anual de lluvias

Ejercicio 30. Lo que carga cada rama de la celda

La celda de Hadley de invierno mueve unos 10^{11} kg de aire por segundo. La rama alta va hacia el polo con energía estática seca $s = c_p T + gz \approx 345$ kJ/kg. La rama baja vuelve hacia el ecuador con $s \approx 300$ kJ/kg y humedad específica de 15 g/kg.

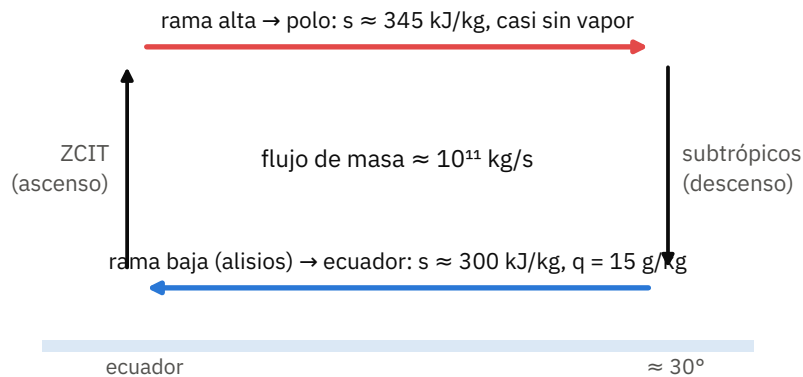


Figura 30. Las dos ramas de la celda de Hadley con los valores del enunciado.

1. Calcule el transporte de energía estática seca de la rama alta (hacia el polo) y el de calor latente de la rama baja (hacia el ecuador), en PW.
2. Calcule el transporte neto. ¿Qué fracción de lo que mueve cada rama sobrevive como transporte neto? ¿Por qué se dice que la celda de Hadley es «ineficiente»?
3. Los alisios llevan ese vapor a la ZCIT. Si se condensa sobre una franja de 1000 km de ancho que da la vuelta al planeta (40 000 km), ¿cuántos mm/día de lluvia aporta? Las ZCIT reales tienen de 6 a 10 mm/día: ¿de dónde sale el resto?
4. Si el calentamiento global aumenta la humedad de los alisios 7 % por K pero la celda no cambia de intensidad, ¿qué le pasa a la lluvia en la ZCIT y a la evaporación neta en los subtrópicos? Relacione con la frase «lo húmedo se vuelve más húmedo y lo seco más seco».

Ejercicio 31. Un modelo de la ZCIT para Colombia

Sobre el norte de Suramérica, suponga que la latitud de la ZCIT sigue

$$\varphi(t) = 3,5^\circ + 8,5^\circ \sin\left(\frac{2\pi(t-105)}{365}\right)$$

con t en días del año, y que llueva en una ciudad cuando la ZCIT está a menos de 3° de ella.

1. ¿Cuándo está la ZCIT más al norte y cuándo más al sur? ¿Qué tiene que ver ese rango con el ecuador térmico y con el Sol?
2. Calcule las fechas en que la ZCIT pasa sobre Bogotá ($4,6^\circ$ N), Quibdó ($5,7^\circ$ N), Riohacha ($11,5^\circ$ N) y Leticia ($4,2^\circ$ S). ¿Qué ciudades tienen dos temporadas de lluvia y cuáles una?
3. Compare las fechas de Bogotá con sus meses más lluviosos reales (abril–mayo y octubre–noviembre). ¿Funciona el modelo?
4. El modelo predice para Riohacha un solo máximo en julio, pero allí julio es seco y el máximo es en octubre. ¿Qué le falta al modelo? Para Quibdó predice meses secos, pero llueve todo el año. ¿Qué le falta ahí?
5. Si los dos pasos de la ZCIT están muy cerca en el tiempo, como en Leticia, ¿qué se observa: dos temporadas o una? Generalice: ¿cómo cambia el ciclo anual al moverse del ecuador hacia el borde norte del recorrido?

Huracanes

Ejercicio 34. Intensificación rápida y estela fría

Registro de un huracán en el Caribe occidental cada 6 horas (datos *ilustrativos*). Temperatura del mar $29,5^\circ\text{C}$, cizalladura vertical de 5 nudos.

Hora	0	6	12	18	24	30	36	42
Viento máximo (nudos)	45	55	70	90	110	135	140	140
Presión central (hPa)	998	990	978	962	945	925	918	920

1. Se llama intensificación rápida a un aumento de al menos 30 nudos en 24 horas. Identifique los periodos que cumplen la definición. ¿Cuánto es el máximo aumento en 24 horas?
2. Nombre tres condiciones del ambiente que lo permitieron y explique la física de cada una.
3. Bajo el huracán, la capa de mezcla del mar tiene 30 m a $29,5^\circ\text{C}$ y debajo el agua está a 26°C . Si el viento mezcla el océano hasta 80 m de profundidad, ¿a qué temperatura queda la superficie? Con la intensidad potencial del ejercicio 7, ¿cuánto se reduce?
4. Explique por qué un huracán lento se debilita más por su propia estela fría que uno rápido, y por qué el Caribe occidental, con agua cálida profunda, es peligroso para la intensificación rápida.
5. 48 horas antes, el pronóstico oficial decía categoría 1 a 2 y el huracán llegó a categoría 5. Escriba el mensaje que habría emitido usted ese día para una isla pequeña, sabiendo que la intensidad se pronostica peor que la trayectoria.

Ejercicio 35. Una isla frente a un huracán

Un huracán con vientos de rotación de 50 m s^{-1} se desplaza hacia el oeste a 6 m s^{-1} por el hemisferio norte. Su presión central es de 920 hPa y la del ambiente, 1010 hPa.

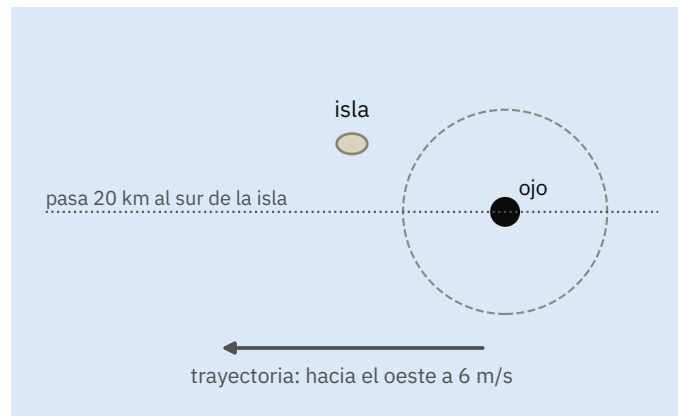


Figura 35. Posición de la isla respecto a la trayectoria del huracán (escala aproximada).

1. ¿En qué lado del huracán el viento total es más fuerte y cuánto vale ahí? ¿Y en el lado opuesto?
2. La presión baja levanta el mar (efecto de barómetro invertido: 1 cm por cada hPa). ¿Cuánto sube el nivel del mar bajo el ojo solo por esa causa?
3. La mayor parte de la marea de tormenta en un continente la produce el viento que empuja agua sobre una plataforma poco profunda. Una isla oceánica pequeña, con laderas submarinas empinadas, ¿tiene marea de tormenta grande o pequeña? ¿Cuál es entonces su mayor amenaza?
4. El huracán pasará 20 km al sur de la isla. ¿Qué costa de la isla recibe el viento más fuerte y de qué dirección llega? ¿Cambia su respuesta si pasa 20 km al norte?
5. Ordene, de mayor a menor, cuánto le preocuparían tres errores de pronóstico de 50 km: hacia el norte, hacia el sur y a lo largo de la trayectoria (llegada antes o después). Justifique.

Frentes fríos y cálidos

Ejercicio 36. Pendientes, nubes y paraguas

Un frente cálido tiene pendiente 1:150 y avanza a 7 m s^{-1} . Un frente frío tiene pendiente 1:80 y avanza a 12 m s^{-1} .

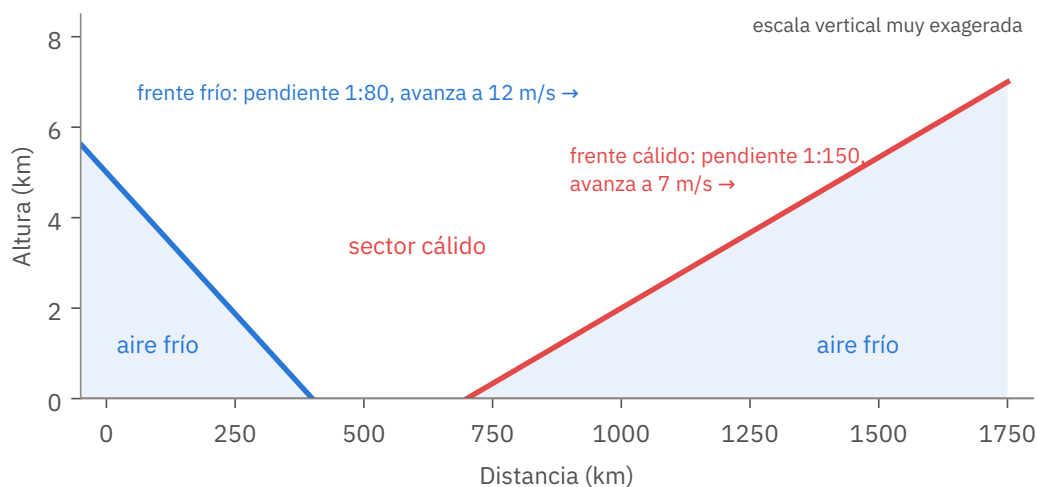


Figura 36. Corte vertical de los dos frentes con las pendientes del enunciado.

1. Los cirros del frente cálido aparecen donde la superficie frontal está a 7 km de altura. ¿A qué distancia del frente en superficie están? ¿Cuántas horas antes de que pase el frente los ve un observador?
2. La lluvia del frente cálido cae en una franja de 300 km delante del frente; la del frío, en una franja de 50 km. Calcule cuánto dura la lluvia en una estación con cada frente.
3. Explique con la pendiente y con el tipo de ascenso por qué un frente da lluvia débil y continua de nimbostratos y el otro aguaceros de cumulonimbos.
4. Un agricultor ve cirros que se espesan durante la mañana y una presión que baja despacio. ¿Qué le dice usted sobre el tiempo de las próximas 48 horas, en orden?
5. ¿Por qué el frente frío alcanza casi siempre al cálido? ¿Qué se forma cuando lo alcanza?

Cuarta serie · Problemas tipo libro de texto

Clima

Ejercicio 39. Cuánto sol llega a Medellín y a Oslo

Tipo de problema: Hartmann, cap. 2. En la presentación: «Ángulo de incidencia, inclinación del eje y estaciones» (fórmula de la insolación media diaria).

Use la fórmula de la insolación media diaria en el tope de la atmósfera con $S_0 = 1361 \text{ W m}^{-2}$. Tome $(d/d_0)^2 = 0,97$ en el solsticio de junio, 1,00 en el equinoccio y 1,03 en el solsticio de diciembre ($\delta = +23,44^\circ$, 0° y $-23,44^\circ$).

1. Calcule la insolación diaria en Medellín ($6,2^\circ \text{ N}$) en las tres fechas. ¿Cuál es la razón entre el máximo y el mínimo?
2. Haga lo mismo para 60° N y para el polo norte. Explique por qué en junio el polo recibe más energía diaria que el ecuador.
3. En el ecuador, la insolación de diciembre es mayor que la de junio. ¿Por qué, si en los dos solsticios el Sol está a la misma distancia angular del ecuador?
4. Con sus resultados, explique por qué en Colombia las estaciones se definen por la lluvia y no por la temperatura, mientras que en Oslo pasa lo contrario.

Ejercicio 40. La superficie que evapora un metro de agua al año

Tipo de problema: Hartmann, cap. 4; Dingman, cap. 3. En la presentación: «Balance anual de energía de la Tierra» y «Más calor, más vapor».

En el balance global, la superficie entrega 80 W m^{-2} como calor latente y 17 W m^{-2} como calor sensible ($L = 2,5 \times 10^6 \text{ J/kg}$).

1. Convierta el flujo de calor latente en evaporación media global, en mm por año. Compare con la lluvia media del planeta, cerca de 1000 mm. ¿Por qué tienen que ser casi iguales?
2. Calcule la razón de Bowen global (sensible / latente). En un desierto con 100 W m^{-2} de radiación neta y razón de Bowen 5, ¿cuánto se evapora al año?

- La lluvia media global crece cerca de 2 % por °C. ¿Cuántos W m^{-2} de calor latente adicional exige cada grado? Compárelo con el forzamiento de duplicar el CO_2 ($3,7 \text{ W m}^{-2}$) y explique por qué la lluvia media no puede crecer al 7 % por °C de Clausius–Clapeyron.
- Sobre la sabana de Bogotá se seca un humedal y se convierte en potrero. ¿Qué pasa con la razón de Bowen y con la temperatura del aire en las tardes? Explique con el balance de energía.

Ejercicio 41. Temperatura potencial y combustible de la tormenta

Tipo de problema: Wallace y Hobbs, cap. 3. En la presentación: «La tasa adiabática seca» y «Cuando el vapor se condensa: la tasa adiabática húmeda» (fórmulas de θ y θ_e).

Sondeo de mediodía en una estación de la llanura del Caribe:

Presión (hPa)	1000 (superficie)	925	850	700	500
T (°C)	33	23	18	9	−6

El aire de superficie tiene una razón de mezcla de 18 g/kg. A 500 hPa la presión de vapor de saturación es 3,9 hPa.

- Calcule θ en cada nivel con $\theta = T (1000/p)^{0,286}$. ¿Qué capas son estables y cuáles inestables para el aire seco?
- Calcule θ_e del aire de superficie con la aproximación de la presentación, $\theta_e \approx \theta \exp(L r / c_p T)$.
- Calcule la θ_e que tendría el aire a 500 hPa si estuviera saturado (θ_e^*), con $r_s = 0,622 e_s / (p - e_s)$.
- Una parcela conserva su θ_e al subir. Compare la θ_e de superficie con la θ_e^* de 500 hPa: si la parcela llega a 500 hPa, ¿está más caliente o más fría que el ambiente? ¿Qué le dice eso sobre la CAPE de la tarde?
- Si en la mañana la superficie estaba a 28 °C con la misma humedad, repita el cálculo de 1 en superficie. ¿Qué cambió entre la mañana y el mediodía?

Ejercicio 43. Calcular el ONI y decidir si hay El Niño

Tipo de problema: ejercicios de monitoreo de ENSO. En la presentación: «El Niño: monitoreo» y «El Niño en Colombia: por qué llueve menos y qué ha pasado».

Anomalías mensuales de temperatura del mar en la región Niño 3.4 (°C, datos *ilustrativos*):

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	−0,2	−0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	1,8
2	1,7	1,4	1,0	0,6	0,3	0,0	−0,3	−0,5	−0,7	−0,8	−0,9	−0,8

Para la intensidad use la clasificación habitual del pico del ONI: débil 0,5–0,9; moderado 1,0–1,4; fuerte 1,5–1,9; muy fuerte 2,0 o más.

- Calcule el ONI (media móvil de tres meses) para todos los trimestres posibles.
- Con el criterio de la presentación (al menos cinco trimestres móviles seguidos por encima de +0,5 °C), ¿hubo El Niño? ¿En qué trimestre empezó y en cuál terminó? ¿Qué intensidad tuvo?
- Al final del año 2, ¿puede declararse La Niña? Justifique con el criterio.

- Según la presentación, ¿en qué trimestre y en qué regiones de Colombia esperaría el mayor déficit de lluvia de este evento?
- ¿Por qué se usa una media móvil de tres meses y no el valor mensual? ¿Qué se pierde con ella?

Hidrología

Ejercicio 44. El ciclo global del agua en números

Tipo de problema: Dingman, cap. 3 (tiempos de residencia). En la presentación: «Balance anual de energía de la Tierra» y «Ríos atmosféricos en el satélite» (agua precipitable).

Valores globales aproximados (Abbott et al., 2019): almacenamientos en km^3 y flujos en km^3 por año.

Almacenamiento	km^3	Flujo	$\text{km}^3/\text{año}$
Océano	1 340 000 000	Evaporación del océano	420 500
Atmósfera	13 000	Lluvia sobre el océano	380 500
Ríos	1 900	Lluvia sobre los continentes	110 600
Humedad del suelo	54 100	Evapotranspiración continental	68 900
		Caudal de los ríos al mar	46 000

- Compruebe el balance del océano y el de los continentes. ¿Cierran? ¿Qué dice la diferencia sobre la incertidumbre de estos números?
- Calcule el tiempo de residencia del agua en la atmósfera, en los ríos, en el suelo y en el océano (almacenamiento / flujo de salida).
- Pase la evaporación total a W m^{-2} de calor latente sobre la superficie del planeta ($5,1 \times 10^8 \text{ km}^2$). Compárelo con el valor del balance de energía de la presentación.
- Con los tiempos de residencia, ordene qué almacenamiento responde primero al calentamiento global y cuál tardaría más en limpiarse de un contaminante. Justifique.

Ejercicio 45. El agua que cabe en la columna

Tipo de problema: Chow, Maidment y Mays, cap. 3 (agua precipitable). En la presentación: «Ríos atmosféricos» (IVT), «Ríos atmosféricos en el satélite» y «Más calor, más vapor».

Sondeo en Quibdó. El agua precipitable es $W = (1/g) \int q \, dp$.

Presión (hPa)	1000	850	700	500	300
Humedad específica (g/kg)	18	14	9	4	0,5

- Calcule el agua precipitable capa por capa (usando el promedio de cada capa) y el total, en mm. Compare con los valores tropicales de la presentación.
- Un sistema convectivo deja 120 mm en 6 horas sobre un cuadrado de 50 km de lado. Si la tormenta solo puede exprimir la mitad del agua de la columna, ¿cuánta agua tiene que entrar desde los alrededores? Exprese la respuesta como un IVT neto hacia adentro, promediado sobre los cuatro lados.
- Con Clausius–Clapeyron, ¿cuánto aumentaría el agua precipitable con 2°C más, si la humedad relativa no cambia? ¿Y el aguacero del punto 2?

4. ¿Qué capa aporta más agua precipitable? ¿Qué dice eso sobre dónde conviene medir la humedad para pronosticar aguaceros?

Ejercicio 46. El balance de una cuenca andina

Tipo de problema: Dingman, cap. 2 (balance hídrico); elasticidad del caudal. En la presentación: «Balance anual de energía de la Tierra», «El Niño en Colombia» y «Agua y energía: un año seco visto desde un embalse».

Una cuenca andina de 50 000 km² recibe 2000 mm de lluvia al año y su caudal medio en la desembocadura es 1400 m³/s (datos *ilustrativos*). La radiación neta media en superficie es 120 W m⁻².

1. Exprese el caudal como lámina de agua (mm/año) sobre la cuenca. Con el balance de largo plazo ($P = ET + Q$), estime la evapotranspiración y el coeficiente de escorrentía.
2. Calcule la evapotranspiración máxima que permitiría la energía disponible si toda la radiación neta se fuera en evaporar. ¿La cuenca está limitada por agua o por energía?
3. En un año Niño la lluvia cae 20 % y la evapotranspiración sube 5 % (más sol y más calor). Calcule el nuevo caudal en mm y en m³/s, y la elasticidad del caudal (cambio relativo del caudal / cambio relativo de la lluvia).
4. Explique por qué la elasticidad es mayor que 1 y por qué eso hace que El Niño pese tanto en un sistema eléctrico hidráulico.
5. Se propone reforestar el 30 % de la cuenca. ¿Qué esperaría que pase con la evapotranspiración, con el caudal medio y con el caudal de la temporada seca? ¿Qué dato necesitaría para responder con números?

Ejercicio 47. Periodo de retorno, riesgo y cambio climático

Tipo de problema: Chow, Maidment y Mays, cap. 11 (riesgo hidrológico). En la presentación: «Qué significa “lo normal”» y «Más calor, más vapor» (lluvia de 1 en 100 días).

El periodo de retorno es $T = 1/p$, donde p es la probabilidad de superar un valor en un año (o en un día, si se habla de días). La probabilidad de que ocurra al menos una vez en n años es $R = 1 - (1 - p)^n$.

1. Un puente dura 50 años. ¿Qué probabilidad tiene de ver al menos una creciente de 100 años? ¿Y la alcantarilla del ejercicio 13, diseñada para 25 años?
2. ¿Qué periodo de retorno habría que usar para que el riesgo en 50 años sea de 10 %?
3. Como en la presentación, suponga que la lluvia diaria sigue una distribución exponencial de media 10 mm: $P(X > x) = \exp(-x/10)$. Calcule la lluvia diaria de «1 en 100 días».
4. Con 2 °C más, todas las intensidades crecen 7 % por °C. ¿Con qué frecuencia se supera ahora el valor del punto 3? ¿Cuántos días al año, antes y después?
5. Explique por qué un cambio pequeño en la media produce un cambio grande en la frecuencia de los extremos.

Ejercicio 48. La caja de humedad sobre Colombia

Tipo de problema: Peixoto y Oort, cap. 12 (balance atmosférico del agua). En la presentación: «Ríos atmosféricos» (IVT), «Los chorros de bajo nivel» y «Los ríos aéreos de Suramérica».

Una caja de $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ cubre buena parte de Colombia. El IVT medio anual perpendicular a cada lado es (datos *ilustrativos*): entra $150 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ por el este (alisios desde la Orinoquía), entra 40 por el oeste (chorro del Chocó), entra 30 por el norte y sale 190 por el sur.



Figura 48. Transporte de vapor (IVT) a través de cada lado de la caja (datos ilustrativos).

1. Calcule la convergencia neta de vapor en la caja y exprese $P - E$ en mm por año.
2. En estado estacionario, $P - E$ sobre la tierra es igual a la escorrentía. ¿Cuánto caudal (m^3/s) deberían llevar los ríos que salen de la caja?
3. Si la evapotranspiración es 1100 mm por año, ¿cuánto llueve? ¿Qué fracción de la lluvia viene del vapor que entra por los lados?
4. Una estimación simple de la fracción reciclada (Brubaker et al., 1993) es $\rho = EA / (EA + 2F)$, donde EA es la evapotranspiración total de la caja (kg/s) y F el vapor que entra (kg/s). Calcúlela. ¿Por qué aumenta si la caja es más grande?
5. En un año Niño el chorro del Chocó se debilita y deja de entrar vapor por el oeste. Con lo demás igual, ¿cuánto cambia $P - E$?

Ejercicio 49. Talar la selva y la lluvia de los Andes

Tipo de problema: Eltahir y Bras (1994), modelos de reciclaje a lo largo de una trayectoria. En la presentación: «Los ríos aéreos de Suramérica y el reciclaje de la Amazonía» (modelo didáctico).

Use el modelo de la presentación: el vapor viaja desde el Atlántico hasta los Andes en cinco tramos; en cada tramo llueve el 30 % del vapor y la vegetación devuelve al aire el 60 % de esa lluvia si hay selva o el 35 % si hay pastos.

1. ¿Qué fracción del vapor inicial llega al quinto tramo con selva completa? ¿Y con pastos en todo el camino?
2. ¿Cuánto cambia la lluvia del quinto tramo, el pie de los Andes, entre los dos casos?
3. Si se talan solo dos tramos, ¿importa cuáles? Responda con el modelo y después diga si cree que en la realidad también sería así.
4. Nombre dos procesos físicos que el modelo no incluye y diga en qué dirección cambiaría cada uno el resultado.

Ejercicio 50. ¿Cuánto embalse hace falta?

Tipo de problema: curva de masas de Rippl, clásica en los textos de hidrología aplicada. En la presentación: «Agua y energía: un año seco visto desde un embalse» y el ciclo anual bimodal (Parte 4).

Aportes medios mensuales a un embalse andino (m^3/s , datos *ilustrativos*) con ciclo bimodal. Un mes de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ equivale a unos $2,63 \text{ hm}^3$.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aporte (m^3/s)	40	35	45	90	110	80	60	55	70	115	120	70

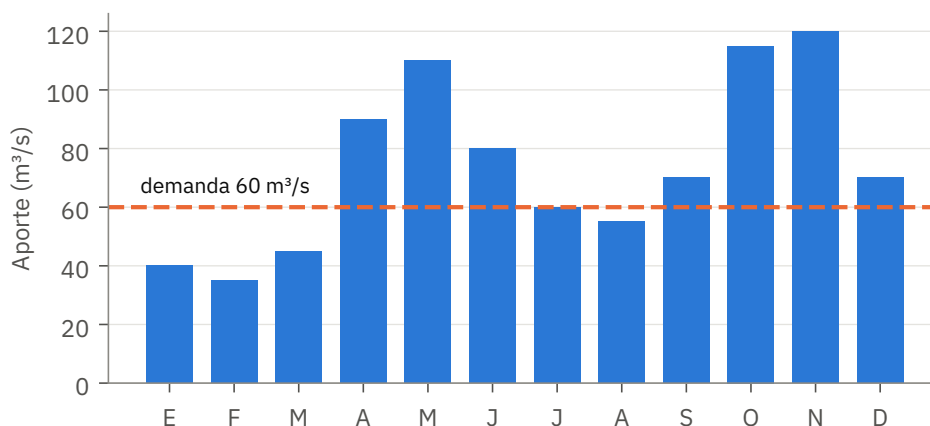


Figura 50. Aportes medios mensuales al embalse y demanda constante.

1. Calcule el aporte medio. ¿Se puede entregar $60 \text{ m}^3/\text{s}$ constantes todo el año sin embalse?
2. Con la curva de masas (o sumando déficit y excesos mes a mes), calcule el volumen mínimo de embalse para entregar $60 \text{ m}^3/\text{s}$ en un año normal. Exprese en hm^3 .
3. En un año Niño los aportes de diciembre a abril caen 40 % y los demás 20 %. Si el embalse del punto 2 está lleno en septiembre, ¿en qué mes se queda sin agua?
4. ¿Qué caudal constante podría entregar ese embalse en un año Niño? ¿Qué capacidad necesitaría para mantener los $60 \text{ m}^3/\text{s}$?
5. Con lo visto sobre el pronóstico de ENSO, ¿en qué mes tomaría usted la decisión de reducir la entrega, y con qué información?

Quinta serie · Problemas prácticos

Problemas donde el clima entra en una decisión concreta: dónde poner paneles, cuándo despegar, cuándo regar, cuándo restringir el tráfico. Cada uno dice qué diapositivas usa y qué le da el enunciado. Los datos marcados como *ilustrativos* son plausibles pero inventados.

Energía, transporte y salud

Ejercicio 51. ¿Dónde pongo la granja solar?

En la presentación: insolación diaria (Parte 1), balance de energía y papel de las nubes (Parte 1). El enunciado da un modelo simple de nubosidad.

Una empresa quiere producir 50 GWh al año con paneles de 20 % de eficiencia. Compara tres sitios (nubosidad *ilustrativa*):

Sitio	Latitud	Insolación media anual en el tope (W m^{-2})	Fracción de cielo cubierto N
Riohacha	11,5° N	407	0,35
Medellín	6,2° N	413	0,60
Bogotá	4,6° N	414	0,70

Use para la radiación en superficie $R_s = Q_{\text{toa}} \times 0,75 \times (1 - 0,6 N)$.

1. ¿Por qué la insolación en el tope casi no cambia entre los tres sitios?
2. Calcule la radiación media en superficie y la energía anual en kWh por m^2 (1 W m^{-2} durante un año son 8,77 kWh m^{-2}).
3. ¿Cuántas hectáreas de paneles necesita en cada sitio?
4. Explique con el balance de energía de la presentación qué representan el 0,75 y el 0,6 del modelo.
5. En un año Niño la nubosidad de Bogotá baja a 0,60. ¿Cuánto sube la producción? ¿Qué significa eso para un sistema eléctrico que depende del agua?

Ejercicio 52. Despegar de El Dorado en una tarde caliente

En la presentación: «La tasa adiabática seca» (equilibrio hidrostático). El enunciado da la ley de los gases y la relación de sustentación.

El aeropuerto El Dorado está a 2547 m. Use $\rho = p / (R T)$, con $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. La sustentación de un ala es proporcional a ρV^2 , así que la velocidad de despegue crece como $1/\sqrt{\rho}$ y la carrera de despegue, aproximadamente, como $1/\rho$.

1. Integre la ecuación hidrostática con una temperatura media de 290 K para estimar la presión en El Dorado si en el mar hay 1013 hPa.
2. Calcule la densidad del aire en El Dorado a las 6 a. m. (14 °C) y a las 2 p. m. (22 °C), y en Barranquilla a mediodía (32 °C, 1010 hPa). Compare con 1,225 kg m^{-3} de la atmósfera estándar al nivel del mar.
3. ¿Cuánto más rápido debe ir un avión para despegar de Bogotá en la tarde que al nivel del mar estándar? ¿Cuánto más larga es la carrera?
4. Explique por qué muchos vuelos de carga pesados salen de Bogotá de noche o de madrugada.
5. En un año Niño las tardes de enero son 1 °C más calientes. ¿Importa para un avión? Cuantifique.

Ejercicio 53. ¿Habrà helada esta noche en la sabana?

En la presentación: balance de energía de superficie y contrarradiación (Parte 1), inversiones nocturnas (Parte 2b), brisas de montaña (Parte 2b), El Niño en Colombia (Parte 5). El enunciado da las emisividades.

Es enero, año Niño, en un cultivo de la sabana de Bogotá. A las 6 p. m. el aire está a 12 °C. La superficie emite como cuerpo negro; la atmósfera devuelve $\epsilon_a \sigma T_a^4$, con $\epsilon_a = 0,70$ en una noche despejada y seca y 0,95 con nubes bajas. El suelo entrega 50 W m^{-2} de calor almacenado durante el día. La capa que se enfría tiene 150 m, con $\rho = 0,9 \text{ kg m}^{-3}$ y $c_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

1. Calcule la pérdida neta de onda larga en superficie con cielo despejado y con nubes, tomando superficie y aire a 10 °C.
2. Con el cielo despejado, estime el ritmo de enfriamiento de la capa en K por hora. Si se mantuviera constante, ¿a qué hora llegaría a 0 °C?
3. ¿Por qué el ritmo real disminuye durante la noche? ¿Por qué el fondo de un valle se enfría más que la ladera?
4. Explique por qué las heladas de la sabana se concentran en diciembre–febrero y son peores en años Niño.
5. El agricultor puede regar al atardecer, cubrir el cultivo o usar un ventilador que mezcle el aire de los primeros 20 m. Explique la física de cada medida. ¿Cuándo sirve el ventilador y cuándo no?

Ejercicio 54. Pico y placa ambiental en el valle de Aburrá

En la presentación: estabilidad, inversiones y capa de mezcla (Parte 2b), brisas de valle y de montaña (Parte 2b), ciclo anual de la lluvia en Medellín (Parte 4). El enunciado da un modelo de caja.

Un modelo de caja estima la concentración media de PM_{2,5} en el valle como $C = C^b + E L / (u H)$, donde $E = 0,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ es la emisión, $L = 30 \text{ km}$ la longitud del valle, $u = 1,5 \text{ m s}^{-1}$ el viento a lo largo del valle, H la altura de la capa de mezcla y $C^b = 10 \mu\text{g m}^{-3}$ el fondo regional (valores *ilustrativos*). La norma colombiana para 24 horas es $37 \mu\text{g m}^{-3}$ (Resolución 2254 de 2017).

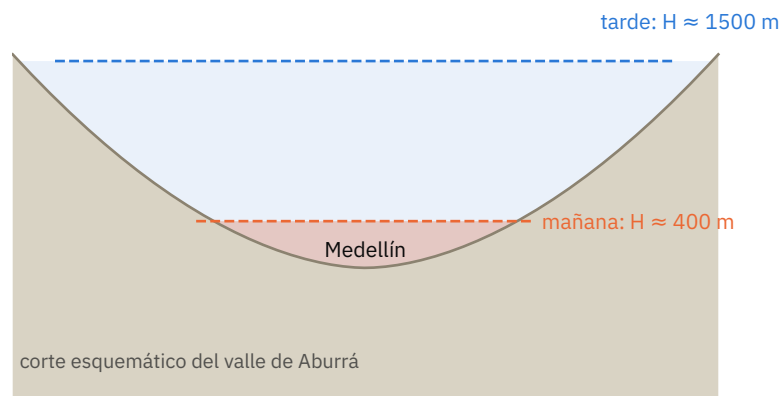


Figura 54. Capa de mezcla en el valle en la mañana y en la tarde (esquema).

1. Calcule C a las 7 a. m. ($H = 400 \text{ m}$) y a las 3 p. m. ($H = 1500 \text{ m}$) de un día soleado. ¿Por qué cambia tanto H entre la mañana y la tarde?
2. En un día nublado de marzo la capa de mezcla no pasa de 600 m en todo el día. Calcule C y compárela con la norma.
3. ¿Cuánto baja C en la mañana si la restricción vehicular reduce las emisiones 20 %? ¿Cuánto si se mantiene el tráfico pero el viento sube a $2,5 \text{ m s}^{-1}$?
4. Explique por qué los episodios críticos se concentran en las temporadas de transición (febrero–abril y octubre–noviembre) y no en los meses más secos.
5. Usted asesora a la autoridad ambiental. ¿Qué dos variables del pronóstico miraría la tarde anterior para decidir si activa la restricción?

Ejercicio 55. Un techo que cosecha lluvia

En la presentación: ciclo anual de la lluvia (Parte 4); ejercicio 24 (datos de Riohacha y Quibdó) y ejercicio 50 (cálculo de almacenamiento).

Una familia de cuatro personas en zona rural de Riohacha quiere cosechar lluvia de un techo de 40 m² con coeficiente de escurrimiento 0,85, para beber y cocinar: 80 litros por día. Use la lluvia mensual de la estación X del ejercicio 24 (Riohacha) y la de la estación Z (Quibdó).

1. Calcule el agua que recoge el techo cada mes y en el año en Riohacha. ¿Alcanza para 80 L/día?
2. ¿Cuál es el consumo máximo que podría sostener ese techo durante el año?
3. Con 60 L/día, calcule el tamaño mínimo del tanque sumando déficit y excesos mes a mes.
4. En un año Niño llueve 30 % menos en Riohacha. ¿Qué recomendación le daría a la familia con anticipación?
5. En Quibdó el mismo techo recoge mucho más de lo necesario. ¿Qué limita el diseño allá?

Ejercicio 56. ¿Esta lluvia detona deslizamientos?

En la presentación: sistemas convectivos de mesoescala y su ciclo diario (Parte 3c), El Niño y La Niña en Colombia (Parte 5), extremos (Parte 7). El enunciado da el umbral.

Un umbral clásico de intensidad y duración para deslizamientos superficiales es el de Caine (1980): $I = 14,82 D^{-0,39}$, con I la intensidad media en mm/h y D la duración en horas. Por encima del umbral aumenta mucho la probabilidad de deslizamientos.

1. Evalúe tres eventos: (a) un sistema convectivo nocturno que deja 60 mm en 3 horas; (b) una lluvia estratiforme de 30 mm en 10 horas; (c) dos días de lluvia continua con 150 mm en 48 horas.
2. Después de un mes muy lluvioso de La Niña, el suelo está saturado y el umbral local baja 30 %. Repita la evaluación.
3. ¿Por qué es delicado usar un umbral calculado con datos de todo el mundo en las laderas de Medellín o de Mocoa? ¿Qué datos usaría para construir uno local?
4. Muchos de estos eventos ocurren de noche. Con lo visto sobre los sistemas convectivos, explique por qué, y qué implica para el diseño de un sistema de alerta.
5. Si el calentamiento aumenta 7 % por °C la intensidad de los aguaceros cortos, ¿cuánto subiría la intensidad del evento (b) con 2 °C? ¿Cruzaría el umbral?

Campo, energía y montaña

Ejercicio 57. ¿Cuándo sembrar?

En la presentación: ciclo anual bimodal y «Qué significa “lo normal”» (Parte 4), El Niño en Colombia (Parte 5); ejercicio 24 (estación W, Bogotá).

Un cultivo de maíz de ciclo medio necesita cuatro meses seguidos con al menos 60 mm cada uno; una variedad de ciclo corto necesita tres. Use la lluvia mensual de la estación W del ejercicio 24.

1. Con la lluvia media, ¿qué ventanas de siembra hay para cada variedad?
2. La media no es lo que el agricultor puede esperar casi siempre. Suponga que la lluvia que se supera en 4 de cada 5 años (lluvia «confiable») es el 70 % de la media en cada mes. Repita el punto 1. ¿Qué cambia?
3. El pronóstico estacional anuncia El Niño para diciembre–febrero, con 30 % menos de lluvia en esos meses. ¿Qué le pasa a la segunda ventana?
4. Con todo lo anterior, escriba la recomendación para una cooperativa en tres líneas: variedad, fecha de siembra y qué señal vigilar.
5. ¿Por qué la lluvia confiable es menor en proporción en los meses de transición que en el pico de las lluvias? Use lo visto sobre la distribución de la lluvia.

Ejercicio 58. Una central a filo de agua

En la presentación: «Agua y energía: un año seco visto desde un embalse» y El Niño en Colombia (Parte 5). El enunciado da la fórmula de potencia.

Una central sin embalse toma agua de un río andino con 300 m de caída y eficiencia de 0,88. Sus turbinas aceptan hasta 40 m³/s y debe dejar 5 m³/s en el río como caudal ecológico. La potencia es $P = \eta \rho g Q H$. Caudales medios mensuales (m³/s, ilustrativos):

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Caudal	20	18	22	45	55	40	30	28	35	58	60	35

1. Calcule la potencia instalada y la potencia media de cada mes.
2. Calcule la energía anual en GWh y el factor de planta (energía real / energía si trabajara siempre a plena potencia).
3. En un año Niño los caudales de diciembre a abril caen 40 % y los demás 20 %. ¿Cuánta energía se pierde? ¿En qué meses?
4. ¿Por qué una central a filo de agua es más vulnerable a El Niño que una con embalse, aunque tengan la misma energía media?
5. ¿Qué fuente complementaría mejor esta central: solar en Riohacha o viento en La Guajira? Use los ejercicios 51 y 59.

Ejercicio 59. Viento de La Guajira contra el ciclo del agua

En la presentación: chorro de bajo nivel del Caribe (Parte 3c), ciclo anual bimodal (Parte 4), El Niño en Colombia (Parte 5). El enunciado da la ley cúbica de la potencia del viento.

Velocidad media mensual del viento a la altura de las turbinas en un parque de La Guajira (m/s, datos ilustrativos). La potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Viento (m/s)	9,5	9,8	9,2	8,5	8,0	9,0	10,0	9,0	7,0	6,5	7,5	8,8

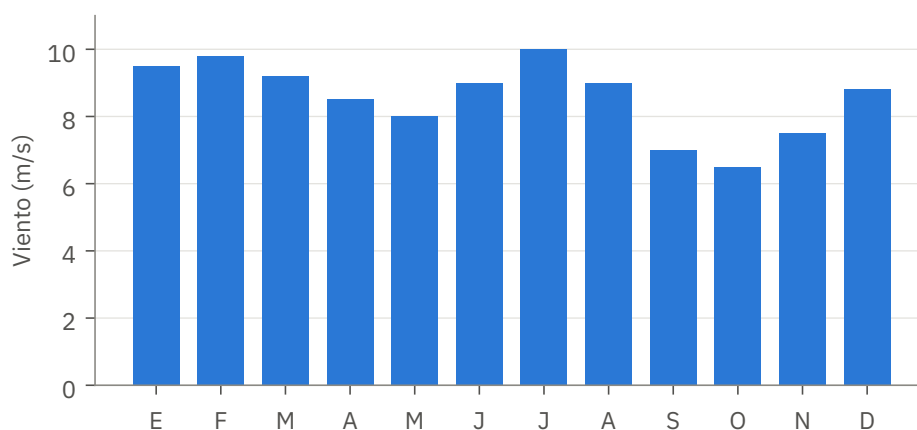


Figura 59. Viento medio mensual a la altura de las turbinas (datos ilustrativos).

1. Calcule la potencia relativa de cada mes respecto al más ventoso. ¿Qué fracción de la energía anual sale de diciembre a marzo?
2. Compare mes a mes con los aportes del embalse del ejercicio 50. ¿Las dos fuentes se complementan?
3. ¿Qué mecanismo del curso explica los máximos de viento de julio y de enero–febrero?
4. Un año con el viento 10 % más fuerte, ¿cuánto más produce? Según la presentación, ¿qué le pasa al chorro del Caribe en el verano boreal de un año Niño?
5. Calcular con la velocidad media mensual subestima la energía. Explique por qué con un ejemplo de dos días: uno con 5 m/s y otro con 11 m/s.

Ejercicio 60. El agua que se lleva el sol

En la presentación: balance de energía de superficie y razón entre calor sensible y latente (Parte 1); ejercicios 40 y 50.

Un embalse andino tiene 25 km² de espejo de agua. Sobre el agua la razón de Bowen es 0,15. En la temporada seca de un año normal la radiación neta media es 140 W m⁻²; en un año Niño, con menos nubes, sube a 170 W m⁻².

1. Calcule la evaporación en mm por día en cada caso.
2. Exprese la pérdida como caudal (m³/s) y como volumen en una temporada seca de 120 días (hm³).
3. Compare con el almacenamiento calculado en el ejercicio 50. ¿Es una pérdida importante?
4. Se propone cubrir el 10 % del espejo con paneles solares flotantes. Estime cuánta agua se ahorra en la temporada seca de un año Niño y discuta dos efectos secundarios.

Ejercicio 61. Subir a un nevado sin que la tormenta lo alcance

En la presentación: equilibrio hidrostático y gradiente vertical (Parte 2b), brisas de valle y de montaña y estabilidad durante el día (Parte 2b), clima de montaña; ejercicio 18.

Un grupo planea subir a una cumbre de 5300 m. La temperatura media en Bogotá (2600 m) es 14 °C y el gradiente vertical medio es 6,1 K/km. Use una altura de escala de 8 km para la presión.

1. Estime la temperatura media en la cumbre y la altura media de la isoterma de 0 °C.

2. Calcule la presión en la cumbre como fracción de la del nivel del mar. ¿Qué significa para el oxígeno disponible?
3. Con lo visto sobre el ciclo diario de la convección en montaña, ¿a qué hora conviene salir del refugio a 4600 m y a qué hora hay que estar de regreso en la roca, lejos de la cumbre? Justifique con la física, no con la costumbre.
4. Al amanecer, ¿dónde hace más frío: en el fondo del valle a 3800 m o en una ladera a 4200 m? ¿Por qué?
5. Si un año Niño calienta la región 0,5 °C, ¿cuánto sube la isoterma de 0 °C? Relacione con el ejercicio 18.

Ejercicio 62. El Niño también prende los aires acondicionados

En la presentación: *El Niño en Colombia, más radiación y temperatura (Parte 5)*. El enunciado da la definición de grados-día.

La demanda de aire acondicionado en Barranquilla es aproximadamente proporcional a los grados-día de enfriamiento: la suma, día por día, de cuánto supera la temperatura media diaria a 24 °C (los días por debajo de 24 °C cuentan cero).

1. En un mes normal la temperatura media diaria es 28 °C todos los días. Calcule los grados-día del mes (30 días).
2. En un año Niño el mes es 0,8 °C más caliente. ¿Cuánto sube la demanda de aire acondicionado, en porcentaje?
3. Si en un mes normal el aire acondicionado de la ciudad consume en promedio 300 MW, ¿cuántos MW más pide en el mes Niño? Compárelo con la potencia media que pierde la central del ejercicio 58 en un año Niño.
4. Ahora la mitad de los días del mes están a 23 °C y la otra mitad a 33 °C (media de 28 °C). Recalcule los grados-día. ¿Por qué no da lo mismo que en el punto 1?
5. ¿Qué dos señales del sistema eléctrico se juntan en un año Niño y por qué eso hace que el riesgo de racionamiento crezca más que cada efecto por separado?

Sexta serie · Concepto y argumentación

Preguntas para responder en pocas líneas y sin calculadora. Lo que cuenta es el porqué: una respuesta correcta sin justificación no sirve para el parcial.

Preguntas rápidas

Ejercicio 63. Preguntas rápidas: energía e invernadero

Responda sin hacer cuentas largas. En «¿Qué se concluye?» elija una opción y diga por qué fallan las otras dos; en «Verdadero o falso» justifique en dos líneas; en «¿Qué pasaría si...?» razone en dos o tres líneas; en las cadenas causales ordene los eslabones y responda la pregunta final.

1. **¿Qué se concluye?** El centro de la banda de 15 μm del CO_2 ya está saturado: allí casi nada de la radiación de la superficie llega al espacio. Si se duplica el CO_2 : (a) no hay más calentamiento, porque la banda ya absorbe todo lo que puede; (b) el nivel de emisión sube y la Tierra emite desde aire más frío; (c) la estratosfera se calienta, porque absorbe más infrarrojo. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.

2. **Verdadero o falso.** «Medellín recibe más energía solar en junio que en marzo porque está en el hemisferio norte.» Piense en la energía que llega al tope de la atmósfera.
3. **¿Qué pasaría si...?** La Tierra no tuviera inclinación: el eje sería perpendicular a la órbita, con la misma excentricidad de hoy. ¿Seguiría habiendo dos temporadas de lluvia en los Andes colombianos? ¿Cambiaría algo a lo largo del año en la energía que llega a Medellín?
4. **Ordenar la cadena causal.** Ordene estos eslabones, desde la causa hasta el nuevo equilibrio: (a) la atmósfera guarda más vapor de agua, cerca de 7 % por °C; (b) aumenta la concentración de CO₂; (c) la superficie y la troposfera se calientan; (d) la emisión al espacio crece como σT^4 hasta que lo emitido vuelve a igualar lo absorbido; (e) el nivel de emisión sube y la radiación de onda larga que sale al espacio disminuye; (f) el vapor extra eleva aún más el nivel de emisión. Después responda: ¿cuál eslabón es el freno que impide un calentamiento sin límite? Si la temperatura no bajara con la altura ($\Gamma = 0$), ¿cuál eslabón dejaría de funcionar?
5. **¿Qué se concluye?** Venus está a 0,72 UA del Sol, recibe unos 2600 W m⁻² y refleja el 77 %. Su superficie supera los 700 K. (a) Venus es tan caliente porque, al estar más cerca, absorbe más energía solar por metro cuadrado que la Tierra; (b) la temperatura de emisión de Venus resulta menor que la de la Tierra, así que su superficie caliente solo se explica por un efecto invernadero enorme; (c) la temperatura de emisión de Venus debe ser mayor que la de la Tierra, porque la irradiancia casi se duplica. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.
6. **Verdadero o falso.** «En el solsticio de junio el polo norte recibe, en el tope de la atmósfera, menos energía diaria que el ecuador, porque allí el Sol nunca sube mucho sobre el horizonte.»

Ejercicio 64. Preguntas rápidas: circulación y lluvia en Colombia

Responda sin hacer cuentas largas. Siga en cada formato las mismas indicaciones del ejercicio 63.

1. **¿Qué se concluye?** En las Américas la ZCIT va de ~6°S en enero–febrero a ~12°N en julio–agosto. Medellín, a 6°N, tiene temporadas de lluvia en abril–mayo y en octubre–noviembre. (a) Cada temporada es un paso de la ZCIT sobre la ciudad: uno cuando sube hacia el norte y otro cuando regresa al sur; (b) las dos temporadas ocurren en los solsticios, cuando el Sol del mediodía está más alto; (c) un lugar a 12°N también tendría dos temporadas, solo que más separadas en el año. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.
2. **Verdadero o falso.** «La Guajira es casi un desierto porque está lejos de las fuentes de humedad.»
3. **¿Qué pasaría si...?** La Tierra no rotara, pero el Sol siguiera calentando más el ecuador que los polos. ¿Existirían los alisios del noreste? ¿Hasta dónde llegaría la celda de Hadley?
4. **Ordenar la cadena causal.** Ordene los eslabones que llevan a los más de 6000 mm/año del Chocó: (a) los alisios del sureste cruzan el ecuador; (b) la ZCIT se ubica al norte del ecuador; (c) el viento llega del suroeste a la costa pacífica colombiana; (d) el parámetro de Coriolis cambia de signo y el viento se curva hacia la derecha; (e) el aire húmedo del Pacífico choca con la cordillera Occidental y sube; (f) se condensa y llueve en la vertiente de barlovento. Después responda: si la ZCIT se quedara todo el año sobre el ecuador, falla (b); ¿cuál de los demás eslabones se rompe primero? ¿Cuál eslabón comparte el Chocó con el monzón de la India?
5. **Verdadero o falso.** «El aire que baja por la ladera de sotavento hacia un valle interandino llega más frío que cuando empezó a subir por barlovento, porque se enfrió durante el ascenso.»

6. **¿Qué se concluye?** El límite inferior de un páramo de la cordillera Oriental está hoy a unos 3000 m, y la temperatura media sube 1 °C. (a) El límite sube unos 170 m y el páramo pierde área, porque la montaña se angosta hacia la cima; (b) el límite sube unos 170 m y el páramo conserva su área: solo se traslada hacia arriba; (c) el páramo no cambia, porque el gradiente vertical de temperatura sigue siendo de ~6 °C por km. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.

Ejercicio 65. Preguntas rápidas: tormentas, huracanes y frentes

Responda sin hacer cuentas largas. Siga en cada formato las mismas indicaciones del ejercicio 63.

1. **Ordenar la cadena causal.** Ordene los eslabones del motor de un huracán, empezando por la convergencia: (a) la columna cálida es menos densa y la presión en superficie cae; (b) el aire converge en espiral en la capa límite y recoge vapor del mar; (c) el calor latente calienta la columna sobre el centro: se forma el núcleo cálido; (d) el vapor se condensa; (e) el aire sube en la pared del ojo; (f) el gradiente de presión acelera la entrada de aire, que evapora más agua del mar. Después responda: ¿cuál eslabón rompe una cizalladura vertical fuerte, de más de 10 m/s entre 850 y 200 hPa?
2. **Verdadero o falso.** «Una tarde en los Llanos con CAPE de 2300 J/kg tendrá tormenta, porque hay energía de sobra.» El sondeo muestra además una inversión a 1,5 km y una CIN de 95 J/kg.
3. **¿Qué se concluye?** Un sondeo tropical muestra que, entre 1 y 5 km, la temperatura del entorno baja 6,5 °C por km. En esa capa la adiabática húmeda es de ~5 °C por km. (a) La capa es condicionalmente inestable: estable para una parcela que no se satura, inestable para una que se satura; (b) la capa es absolutamente inestable, porque la temperatura baja con la altura; (c) la capa es absolutamente estable, porque 6,5 es menor que 9,8. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.
4. **¿Qué pasaría si...?** Un frente con el mismo contraste de temperatura y el mismo cambio de viento que uno típico de 45°N apareciera a 2°N, frente a la costa caribe. ¿Qué le pasaría a su pendiente? ¿Qué quedaría de él al cabo de unos días?
5. **¿Qué se concluye?** En una ciudad de latitudes medias el cielo se cubre primero de cirros, luego de cirroestratos con halo y después de altoestratos. Al día siguiente llueve de forma continua durante muchas horas. Cuando para, la temperatura sube y el viento rola del sureste al suroeste. (a) Pasó un frente cálido; (b) pasó un frente frío lento, por eso la lluvia duró tanto; (c) pasó un frente ocluido, porque la lluvia fue larga y extensa. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.
6. **Verdadero o falso.** «La corriente en chorro se forma donde el aire es más caliente; por eso el chorro más intenso de cada hemisferio está sobre el ecuador.»

Ejercicio 66. Preguntas rápidas: variabilidad y cambio

Responda sin hacer cuentas largas. Siga en cada formato las mismas indicaciones del ejercicio 63.

1. **¿Qué se concluye?** En noviembre de cierto año el índice Niño 3.4 está por encima de +2 °C. Para la región andina de Colombia en diciembre–febrero: (a) aumenta la probabilidad de lluvias por debajo de lo normal, porque el norte de Suramérica queda bajo aire que desciende; (b) habrá sequía en todos los municipios andinos; (c) lloverá más, porque un océano más caliente evapora más agua. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.
2. **Verdadero o falso.** «La oscilación Madden–Julian es una onda de Kelvin atmosférica: las dos viajan hacia el este a lo largo del ecuador, así que son el mismo fenómeno.»

- 3. Ordenar la cadena causal.** Ordene el arranque de un El Niño: (a) una onda Kelvin de hundimiento viaja hacia el este; (b) la convección reforzada por la MJO llega al Pacífico occidental; (c) sobre el norte de Suramérica domina el descenso y llueve menos en Colombia; (d) aparecen ráfagas de viento del oeste; (e) la termoclina del Pacífico oriental se profundiza y el afloramiento ya no trae agua fría; (f) la convección se corre hacia el este y los alisios se debilitan aún más; (g) la TSM del este sube y el gradiente este-oeste se reduce. Después responda: ¿qué eslabón cierra la retroalimentación de Bjerknes? ¿Qué proceso, que no está en la lista, termina invirtiendo el evento?
- 4. ¿Qué se concluye?** En un esquema de reciclaje, el vapor entra a la Amazonía desde el Atlántico y avanza hacia los Andes por tramos. En cada tramo llueve el 30 % del vapor que llega, y la vegetación devuelve al aire el 60 % de esa lluvia si hay selva y el 35 % si hay pastos. Se tala el primer tramo, junto a la costa. (a) La mayor parte de la pérdida no cae sobre la franja talada: todos los tramos viento abajo, hasta el piedemonte andino, reciben menos vapor y llueve menos en ellos; (b) la lluvia baja solo sobre la franja talada, y viento abajo todo sigue igual; (c) no cambia nada, porque el vapor que entra desde el Atlántico es el mismo. Elija una y diga por qué fallan las otras dos.
- 5. ¿Qué pasaría si...?** La atmósfera se calentara 2 °C con la misma humedad relativa y los mismos vientos. ¿Qué le pasaría al transporte de vapor (IVT) de un río atmosférico y a la lluvia que deja en una cordillera? ¿Y a los aguaceros extremos y a la lluvia media global?
- 6. Verdadero o falso.** «En el mapa de correlación entre el Niño 3.4 y la lluvia de diciembre–febrero, calculado con 77 años, un píxel tiene $r = 0,15$. Eso muestra que allí El Niño aumenta la lluvia, aunque sea un poco.»

Evaluar un argumento

Ejercicio 67. Un año de La Niña con poca lluvia

Un compañero de clase escribe en el grupo del curso. Lea su argumento y responda.

«El año pasado fue de La Niña y los noticieros anunciaron lluvias por encima de lo normal en todo el país. En Medellín, en cambio, la temporada de octubre y noviembre quedó por debajo de lo normal: lo revisé en los datos de una estación del valle de Aburrá. Si El Niño y La Niña de verdad controlaran la lluvia de Colombia, eso no habría podido pasar. Un solo caso en contra basta para tumbar una ley. Conclusión: el ENSO no influye en el clima colombiano; es un cuento para llenar titulares.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrala y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)?
5. Reescriba la conclusión en dos frases para que sea correcta.

Ejercicio 68. «El CO₂ no importa porque el vapor de agua domina»

Un video corto con muchas reproducciones en redes sociales dice lo siguiente. Lea el argumento y responda.

«El vapor de agua es el principal gas de invernadero: absorbe en casi todo el infrarrojo térmico, y hay mucho más vapor que CO₂ en el aire. El CO₂ es apenas el 0,04 % de la atmósfera. Cualquier espectro de absorción lo muestra: las bandas del vapor ocupan mucho más espacio que la del CO₂. Si el actor principal es el agua, preocuparse por un gas secundario es perder el tiempo. El CO₂ no importa; el clima lo manda el agua.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrala y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)?
5. El video tiene razón en algo. Diga en qué, y explique por qué ese punto, bien entendido, hace al CO₂ más importante y no menos.

Ejercicio 69. El perihelio y la temporada seca

Un influenciador de divulgación científica publica este texto en enero. Lea el argumento y responda.

«En Colombia la temporada seca más fuerte es la de diciembre a febrero: días soleados, calurosos y sin lluvia. No es casualidad. Hacia el 3 de enero la Tierra pasa por el perihelio, a 147 millones de kilómetros del Sol, unos 5 millones más cerca que en julio. Los satélites lo confirman: en esas fechas la irradiancia en el tope de la atmósfera está unos 45 W m^{-2} por encima del promedio. Más sol, menos nubes, menos lluvia. La distancia al Sol explica nuestra temporada seca y, en general, las estaciones de todo el planeta.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrala y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)? Dé al menos uno que se pueda comprobar sin salir de Colombia.

Ejercicio 70. Un invernadero de 15 grados

Un columnista de un diario regional escribe en su sección de ciencia. Lea el argumento y responda.

«La temperatura media de la superficie de la Tierra es de unos 15 °C. Todos los libros dicen que sin efecto invernadero el planeta sería más frío. ¿Cuánto más frío? Basta con quitar la cobija de gases: quedaríamos en cero grados, el punto donde el agua se congela. El efecto invernadero aporta entonces 15 grados, ni más ni menos. Es un efecto modesto, y por eso los gases de invernadero no pueden ser tan decisivos para el clima como se dice.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrala y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)?

5. Reescriba la conclusión para que sea correcta, en lenguaje de periódico y con un número.

Ejercicio 71. Sembrar árboles para traer la lluvia

Un agricultor habla en una reunión sobre un proyecto de reforestación en La Guajira. Lea el argumento y responda.

«En el Chocó hay selva y llueven más de 6000 mm al año. En la Amazonía también hay selva y también llueve mucho. En la alta Guajira casi no hay árboles y casi no llueve. Además, se sabe que la selva devuelve agua al aire y que ese vapor vuelve a llover. La conclusión es clara: los árboles traen la lluvia. Si sembramos un bosque grande en la alta Guajira, en veinte años tendremos lluvias como las del Pacífico.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrela y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)?
5. El reciclaje de humedad por la vegetación es real. Explique en qué condiciones sí importa y por qué no puede producir lluvia donde no llega vapor.

Ejercicio 72. Mar más caliente, más huracanes cada año

Un concejal de un municipio del Caribe interviene en un debate sobre gestión del riesgo. Lea el argumento y responda.

«Un huracán es una máquina que funciona con agua caliente: solo se forma sobre un mar de más de 26,5 °C, y entre más caliente está el mar, más energía tiene. El Caribe se viene calentando década tras década. Por lo tanto, cada temporada tendremos más huracanes que la anterior. El presupuesto de atención de desastres del municipio debe crecer cada año en proporción a la temperatura del mar, porque el número de huracanes que nos amenazan va a seguir esa curva.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrela y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)?
5. Reescriba la conclusión para que sea correcta. ¿Qué parte del argumento del concejal sí se sostiene?

Ejercicio 73. Si en promedio llueve igual, el embalse está tranquilo

El gerente de una empresa de energía habla en la asamblea de accionistas. Lea el argumento y responda.

«Revisamos los escenarios de cambio climático para nuestra cuenca andina. Indican que la lluvia total anual cambiará muy poco hacia mediados de siglo. Nuestro embalse vive del agua que le llega en el año: si la lluvia anual no cambia, los aportes tampoco. Por eso no vemos necesidad de revisar la regla de operación ni la capacidad del vertedero. Para esta central, el cambio climático no es un riesgo.»

1. ¿Cuál es la afirmación principal?
2. ¿Qué evidencia usa para sostenerla?
3. ¿Dónde está la falla del razonamiento? Nómbrala y explíquela con la física del curso.
4. ¿Qué dato o qué observación concreta la refutaría (o la pondría a prueba)?
5. Proponga dos preguntas que el gerente debería hacerle a su equipo técnico antes de concluir que no hay riesgo.