Ejercicios resueltos

Impactos Medioambientales

Primera prueba: atmósfera, combustibles y ciclo de vida

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Hemos preparado once ejercicios del tipo que puede caer, ordenados por bloque. El ejercicio 9 es el de Van Krevelen que se hizo en clase, con los datos oficiales y nuestra solución. Los factores de emisión, los GWP y los coeficientes de dispersión que no vienen en las transparencias se dan como datos del enunciado. Todos los resultados salen de un script de cálculo.

Bloque de atmósfera

Ejercicio 1. Temperatura de equilibrio radiativo

Con $S_0 = 1361\,\mathrm{W/m^2}$, $\sigma = 5{,}67\times10^{-8}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$ y un albedo de 0,30, calcula la temperatura de equilibrio radiativo de la Tierra. Repite el cálculo sin albedo y compara con la media real de 15 °C.

Igualando la energía absorbida y la emitida

$$T_e = \left[\frac{S_0\,(1-\alpha)}{4\sigma}\right]^{1/4} = \left[\frac{1361\cdot 0{,}70}{4\cdot 5{,}67\cdot 10^{-8}}\right]^{1/4} = 254{,}6\ \mathrm{K} = -18{,}6\ ^\circ\mathrm{C}$$

Sin albedo sale 278,3 K, es decir 5,2 °C. La diferencia de unos 34 °C con la media real es el efecto invernadero natural del vapor de agua y del CO_2. El albedo enfría unos 24 °C porque el 30 % de la luz se refleja sin calentar.

Ejercicio 2. Emisiones en CO_2-eq

Una instalación emite al año 1000 t de CO_2, 10 t de CH_4 y 1 t de N_2O. Con GWP de 25 y 298, calcula las emisiones en toneladas de CO_2-eq y el peso de cada gas.

$$E = 1000\cdot 1 + 10\cdot 25 + 1\cdot 298 = 1548\ \mathrm{t\ de\ CO_2\text{-eq}}$$

El CO_2 supone el 64,6 %, el CH_4 el 16,1 % y el N_2O el 19,3 %. Una tonelada de N_2O pesa en el clima casi como 300 de CO_2.

Ejercicio 3. Camión diésel

Un camión ha consumido 10 000 kL de diésel. La densidad es 0,84 kg/L, el poder calorífico neto 43,0 TJ/Gg y los factores de emisión del transporte por carretera son 74 100 kg/TJ de CO_2 y 3,9 kg/TJ de CH_4 y de N_2O. La oxidación es completa y los GWP son 25 y 298. Calcula las emisiones en toneladas de CO_2-eq.

La masa es $10\,000\cdot 1000\cdot 0{,}84 = 8{,}4\times10^6$ kg, o sea 8,4 Gg, y la energía $8{,}4\cdot 43{,}0 = 361{,}2$ TJ. Con la ecuación de emisiones

$$\mathrm{CO_2} = 361{,}2\cdot 74\,100\ \mathrm{kg} = 26\,765\ \mathrm{t}$$
$$\mathrm{CH_4} = 1{,}41\ \mathrm{t}\cdot 25 = 35{,}2\ \mathrm{t\ de\ CO_2\text{-eq}}$$
$$\mathrm{N_2O} = 1{,}41\ \mathrm{t}\cdot 298 = 419{,}8\ \mathrm{t\ de\ CO_2\text{-eq}}$$

El total es 27 220 t de CO_2-eq. El CO_2 es el 98 %, así que en combustión los otros dos gases pesan poco.

Ejercicio 4. Unidades de concentración

(a) Pasa 0,1 ppm de SO_2 a µg/m³ a 25 °C y 1 atm. (b) El valor límite anual de NO_2 es 40 µg/m³. ¿Cuántos ppb son?

A 25 °C y 1 atm un mol de gas ocupa 24,45 L, por lo que la concentración en µg/m³ es la concentración en ppm por $M\cdot 1000/24{,}45$. Con $M = 64{,}07$ para el SO_2 salen 262 µg/m³. Al revés, con $M = 46{,}01$ para el NO_2, los 40 µg/m³ son 21,3 ppb.

Ejercicio 5. Estabilidad atmosférica

Una torre mide 15,0 °C *a* 10 m. *Clasifica la estabilidad si a* 210 m *mide (a)* 13,6 °C, *(b)* 12,0 °C *o (c)* 16,0 °C, *y di cómo sería la pluma de una chimenea.*

Se pasa la diferencia a grados por cada 100 m y se compara con 0,98. En (a) el aire se enfría 0,70 cada 100 m, menos que el adiabático, así que es subadiabático y estable, con pluma en abanico. En (b) se enfría 1,50, más que el adiabático, así que es inestable y la pluma serpentea. En (c) la temperatura sube 0,50 y hay una inversión muy estable que deja el contaminante atrapado.

Ejercicio 6. Perfil de viento

Se miden 1,5 m/s *a* 10 m. *Calcula el viento a* 100 m *en zona urbana, rural y en mar abierto.*

Con la ley de Deacon, $U_{100} = 1{,}5\,(100/10)^{\alpha}$. Sale 3,77 m/s en zona urbana, 2,86 m/s en zona rural y 2,07 m/s en mar abierto. La rugosidad urbana frena mucho el viento cerca del suelo, por eso la diferencia con la altura es mayor.

Ejercicio 7. Modelo de caja

Una ciudad mide 20 km *en la dirección del viento y tiene una altura de mezcla de* 500 m. *El viento es de* 3 m/s, *el aire entra con* 10 µg/m^3 *y la ciudad emite* 5 µg m^{-2} s^{-1}. *(a) Calcula la concentración en régimen estacionario. (b) Si a las 7:00 la caja está a* 10 µg/m^3 *y empieza a emitir, ¿cuánto hay a las 9:00?*

En estacionario

$$C_\infty = \frac{q_s\,L}{U\,H} + C_{in} = \frac{5\cdot 20\,000}{3\cdot 500} + 10 = 66{,}7 + 10 = 76{,}7\ \mu\text{g/m}^3$$

El tiempo característico es $\tau = L/U = 6667$ s, unas 1,85 h. Al cabo de dos horas

$$C = 76{,}7\cdot 0{,}660 + 10\cdot 0{,}340 = 54{,}0\ \mu\text{g/m}^3$$

Es decir, en dos horas se ha recorrido el 66 % del camino hasta el estacionario.

Ejercicio 8. Pluma gaussiana*

Una chimenea con altura efectiva de 100 m *emite* 100 g/s *de* SO_2 *con viento de* 5 m/s *y estabilidad neutra. A* 1 km *se tiene* $\sigma_y = 68$ m *y* $\sigma_z = 32$ m. *Calcula la concentración a nivel del suelo bajo el eje de la pluma.*

$$C = \frac{100}{\pi\cdot 68\cdot 32\cdot 5}\exp\left(-\frac{100^2}{2\cdot 32^2}\right) = 2{,}93\cdot 10^{-3}\cdot 7{,}58\cdot 10^{-3}\ \text{g/m}^3 \approx 22\ \mu\text{g/m}^3$$

Casi todo el resultado lo decide la exponencial. Subir la chimenea o la sobreelevación de la pluma reduce mucho la inmisión.

Bloque de combustibles y ACV

Ejercicio 9. Diagrama de Van Krevelen (ejercicio de clase)

Se han analizado seis rocas madre (porcentajes en masa de la tabla 1). (A) Identifica el tipo y di si se pueden identificar todas. (B) Indica su madurez. (C) ¿Cuáles serían roca madre de petróleo y cuáles de carbón? (D) ¿Alguna ha entrado en la ventana del petróleo?

Tabla 1. Análisis elemental (datos de clase) y relaciones atómicas calculadas.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
C (%)	79,98	68,26	64,39	74,17	56,53	55,92
H (%)	10,92	7,31	6,95	7,54	4,04	4,81
O (%)	4,94	8,81	6,35	4,75	24,80	30,91
S (%)	1,34	9,13	11,04	11,62	1,41	3,44
H/C	1,64	1,28	1,29	1,22	0,86	1,03
O/C	0,046	0,097	0,074	0,048	0,329	0,415

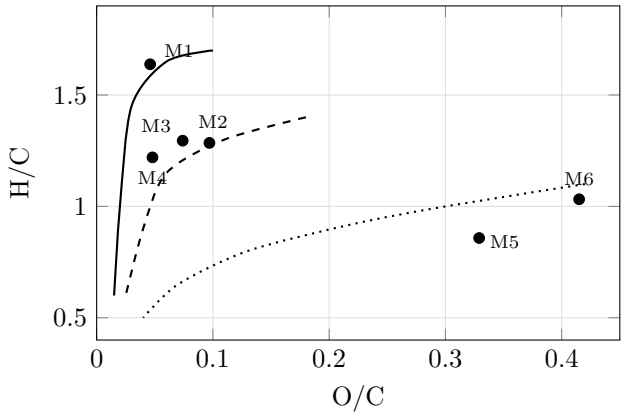


Figura 1. Muestras sobre el diagrama. Línea continua tipo I, discontinua tipo II y punteada tipo III.

Para M1, por ejemplo, $H/C = 10{,}92/(79{,}98/12)$ y $O/C = (4{,}94/16)/(79{,}98/12)$. Con la figura 1 se responde a cada apartado.

(A) M1 es lacustre porque tiene H/C muy alto y O/C muy bajo. M2, M3 y M4 son marinas. Además de caer en la banda del tipo II tienen entre un 9 y un 12 % de azufre, que es típico de este tipo. M5 y M6 son terrestres por su O/C alto. M6 queda algo por encima de la banda III y podría ser una mezcla de los tipos II y III. Con solo dos relaciones no se puede asegurar, así que no todas se identifican con la misma seguridad.

(B) M5 y M6 están en diagénesis porque conservan mucho oxígeno. M1 y M2 están en la transición hacia la catagénesis y M3 y M4 ya en catagénesis.

(C) M1, M2, M3 y M4 serían rocas madre de petróleo. M5 y M6 lo serían de carbón y gas.

(D) M3 y M4 ya han entrado en la ventana del petróleo. M1 y M2 están en su comienzo. En el examen hay que dibujar los puntos sobre la figura que den, que trae los límites de madurez, y justificar con su posición.

Ejercicio 10. Grado API

Un crudo tiene una densidad relativa de 0,876 a 15,6 °C. *Calcula su grado API y clasifícalo. ¿Qué densidad tiene un crudo de 10 API?*

El grado API es $141{,}5/0{,}876 - 131{,}5 = 30{,}0$, un crudo medio. Para 10 API la densidad es $141{,}5/(10+131{,}5) = 1{,}000$, la del agua. Es un crudo extrapesado como el Boscán.

Ejercicio 11. Caracterización en un ACV

El inventario por unidad funcional de un producto da 2,5 kg *de* CO_2, 0,01 kg *de* CH_4, 0,001 kg *de* N_2O, 0,002 kg *de* SO_2 *y* 0,003 kg *de* NO_x. *Los GWP son 1, 25 y 298 y los potenciales de acidificación 1 para el* SO_2 *y 0,7 para los* NO_x. *Clasifica y caracteriza.*

En la clasificación el CO_2, el CH_4 y el N_2O van a cambio climático, y el SO_2 y los NO_x a acidificación. Los NO_x también contribuyen a la formación de ozono y a la eutrofización, y hay que tener cuidado de no contarlos dos veces en la misma categoría. En la caracterización

$$\text{Cambio climático} = 2{,}5 + 0{,}01 \cdot 25 + 0{,}001 \cdot 298 = 3{,}05 \text{ kg de } CO_2\text{-eq}$$
$$\text{Acidificación} = 0{,}002 \cdot 1 + 0{,}003 \cdot 0{,}7 = 0{,}0041 \text{ kg de } SO_2\text{-eq}$$

La normalización y la ponderación son opcionales e introducen juicios de valor.

* El modelo gaussiano se nombra en clase pero la fórmula no aparece en las transparencias.