Capítulo 2 · Ciclos biogeoquímicos globales

Unidad 1 · Contenido sintético 1.2

Cada átomo de carbono de tu cuerpo estuvo antes en el aire, en el mar o en una roca, y volverá a estarlo. Los elementos de la vida circulan entre los compartimentos ambientales en rutas que llamamos **ciclos biogeoquímicos**. En este capítulo aprenderás a describirlos con un lenguaje común (reservorios, flujos y tiempos de residencia) y a reconocer dónde y cómo la actividad humana los ha alterado.

Objetivos de aprendizaje. Al terminar este capítulo podrás:

1. Representar un ciclo como un modelo de cajas y calcular tiempos de residencia y estados estacionarios.
2. Describir los reservorios y flujos principales del carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y agua, con sus órdenes de magnitud.
3. Escribir y balancear las reacciones clave de cada ciclo: fotosíntesis, disolución de CO_2, fijación, nitrificación, desnitrificación, oxidación de SO_2 y de pirita.
4. Asignar números de oxidación a las especies de N y S y relacionarlos con las condiciones óxicas o anóxicas.
5. Calcular la especiación del carbono inorgánico en función del pH.
6. Identificar el nutriente limitante con la razón de Redfield.
7. Cuantificar las perturbaciones humanas y explicar sus consecuencias: cambio climático, acidificación del océano, eutrofización y lluvia ácida.

Conceptos clave

Concepto	Definición breve
Ciclo biogeoquímico	Ruta que sigue un elemento entre atmósfera, hidrosfera, geosfera y biosfera

Concepto	Definición breve
Reservorio	Compartimento donde se almacena el elemento; se mide en masa (Gt C, Tg N)
Flujo	Masa transferida entre reservorios por unidad de tiempo (Gt C/año)
Tiempo de residencia (τ)	Masa del reservorio dividida entre el flujo de salida
Ciclo sedimentario	Ciclo sin fase gaseosa importante; el elemento viaja en agua y polvo (P)
Nitrógeno reactivo (Nr)	Todo el nitrógeno excepto N_2: NH_3, NH_4^+, NO_x, NO_3^-, N_2O, N orgánico
Fijación	Conversión de N_2 inerte en nitrógeno reactivo
Carbono inorgánico disuelto (CID)	Suma $CO_2(ac) + HCO_3^- + CO_3^{2-}$
Fracción aerotransportada	Fracción de las emisiones de CO_2 que permanece en la atmósfera
Razón de Redfield	Proporción atómica C:N:P ≈ 106:16:1 del fitoplancton marino

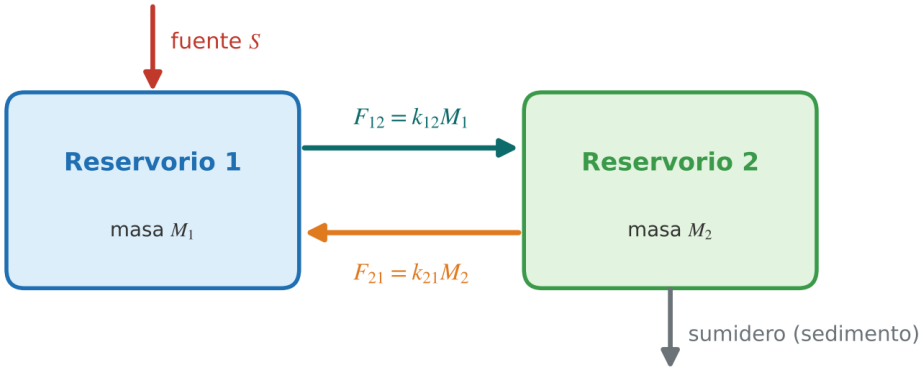
2.1 Reservorios, flujos y modelos de caja

Todos los ciclos se describen con el mismo esquema. Cada **reservorio** se trata como una caja bien mezclada que contiene una masa M del elemento. Entre cajas hay **flujos** F. Es el balance de masa del Capítulo 1 aplicado a escala planetaria:

$$\frac{dM}{dt} = \sum F_{\text{entrada}} - \sum F_{\text{salida}}$$

En **estado estacionario** las entradas igualan las salidas y la masa no cambia. El tiempo de residencia es entonces:

$$\tau = \frac{M}{F_{\text{salida}}} = \frac{M}{F_{\text{entrada}}}$$



Esquema 2.1. *Modelo de dos cajas. Cada flujo es proporcional a la masa del reservorio de origen; la constante k es el inverso del tiempo de residencia respecto a esa salida.*

Si el flujo de salida es proporcional a la masa ($F = kM$, cinética de primer orden), entonces $k = 1/\tau$. Cuando una caja se perturba, regresa a su estado estacionario de forma exponencial:

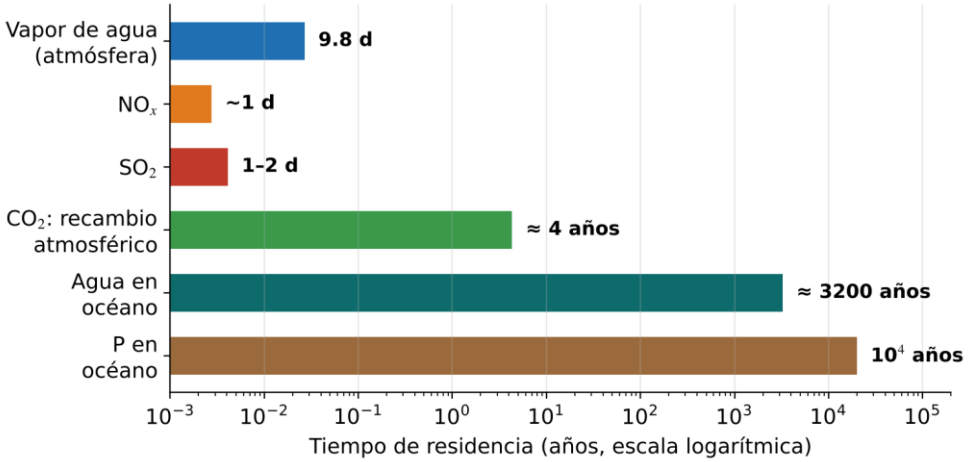
$$M(t) = M_{ee} + (M_0 - M_{ee})\, e^{-t/\tau}$$

En un sistema de dos cajas que solo intercambian entre sí, el estado estacionario cumple $k_{12}M_1 = k_{21}M_2$, es decir:

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{k_{12}}{k_{21}}$$

> **Importante.** El tiempo de residencia de un átomo (cuánto tarda en salir una molécula concreta) no es lo mismo que el **tiempo de ajuste** de una perturbación (cuánto tarda en desaparecer un exceso). Para el CO_2 el primero es de unos 4 años; el segundo, de siglos a milenios. Confundirlos lleva a creer que el CO_2 emitido «desaparece» en pocos años.

Escala del tiempo de residencia. Una sustancia con τ corto (días) tiene concentraciones muy variables en el espacio: el SO_2 y los NO_x se concentran cerca de sus fuentes. Una con τ largo (años) se mezcla en todo el planeta: el CO_2 medido en Mauna Loa representa bien a la atmósfera global.



Gráfica 2.4. *Tiempos de residencia típicos en escala logarítmica. Abarcan siete órdenes de magnitud, desde horas hasta decenas de miles de años.*

Ejemplo 2.1. Tiempo de recambio del CO_2 atmosférico. La atmósfera contiene unos 875 Gt C. Cada año salen hacia la vegetación unos 123 Gt C (fotosíntesis) y hacia el océano unos 80 Gt C. Calcula el tiempo de residencia.
$\tau = M/F = 875/(123 + 80) = 875/203 \approx 4.3$ años.
Interpretación: una molécula de CO_2 dura en promedio unos 4 años en el aire antes de ser absorbida. Sin embargo, casi la misma cantidad regresa por respiración y desgasificación, así que el *exceso* tarda mucho más en eliminarse. El IPCC (2013) estima que entre 15 y 40 % del CO_2 emitido permanece en la atmósfera más de 1000 años.

2.2 El ciclo del carbono

El carbono es el esqueleto de la materia orgánica y, como CO_2 y CH_4, el principal regulador humano del clima. Su ciclo tiene dos velocidades.

El ciclo rápido (años a siglos) conecta la atmósfera, la biosfera y el océano superficial mediante la fotosíntesis y la respiración:

$$\mathrm{CO_2 + H_2O \xrightarrow{h\nu} CH_2O + O_2} \qquad \text{(fotosíntesis)}$$

$$\mathrm{CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O} \qquad \text{(respiración y descomposición)}$$

donde CH_2O representa de forma simplificada la materia orgánica. La producción primaria bruta terrestre es de unos 123 Gt C/año; casi todo regresa por respiración y fuego.

El ciclo lento (miles a millones de años) incluye el océano profundo, los sedimentos carbonatados y la meteorización de silicatos, que retira CO_2 del aire a escala geológica:

$$CaSiO_3 + 2\,CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2\,HCO_3^- + SiO_2$$

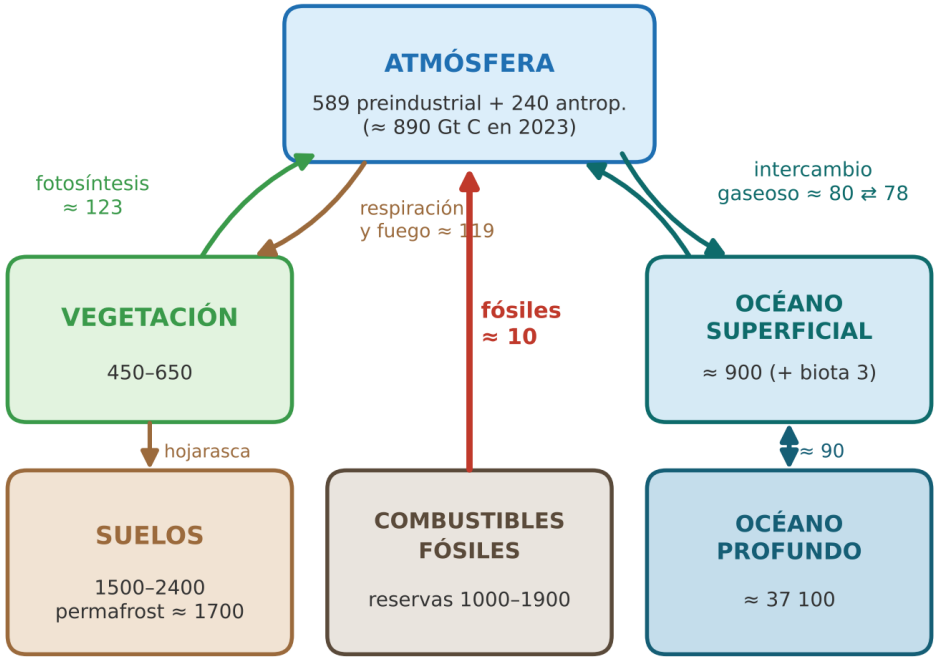


Figura 2.1. *Ciclo global del carbono. Reservorios en Gt C y flujos en Gt C/año, redondeados a partir de Ciais et al. (2013, IPCC AR5) y del Global Carbon Budget 2024.*

Reservorio	Carbono (Gt C)	Forma principal
Atmósfera (2023)	≈ 890	CO_2, CH_4
Vegetación	450–650	Celulosa, lignina
Suelos	1500–2400	Materia orgánica del suelo
Permafrost	≈ 1700	Materia orgánica congelada
Océano superficial	≈ 900	CID
Océano intermedio y profundo	≈ 37 100	CID
Combustibles fósiles (reservas)	1000–1900	Carbón, petróleo, gas
Rocas carbonatadas	> 60 000 000	$CaCO_3$, $MgCO_3$

Conversión útil. Para la atmósfera, 1 ppm de CO_2 equivale a 2.124 Gt C (Friedlingstein et al., 2025).

El sistema de los carbonatos

El océano contiene más de 40 veces el carbono de la atmósfera porque el CO_2 no solo se disuelve, sino que reacciona con el agua:

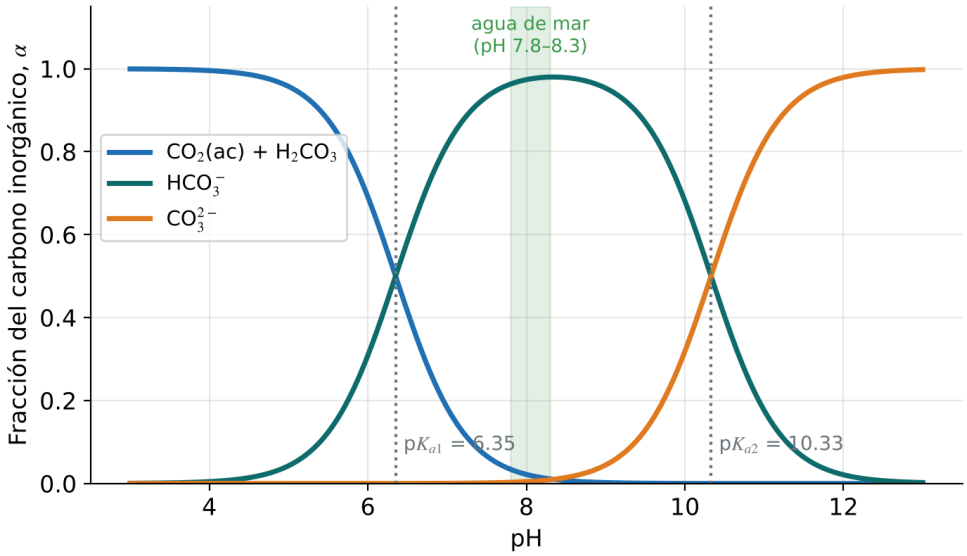
$$\mathrm{CO_2(g) \rightleftharpoons CO_2(ac)} \qquad [\mathrm{CO_2(ac)}] = K_H\, P_{\mathrm{CO_2}}$$

$$\mathrm{CO_2(ac) + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-} \qquad K_1 = 10^{-6.35}$$

$$\mathrm{HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}} \qquad K_2 = 10^{-10.33}$$

Las constantes son para agua dulce a 25 °C; en agua de mar cambian por la fuerza iónica. La fracción de cada especie depende solo del pH:

$$\alpha_0 = \frac{[\mathrm{H^+}]^2}{D}, \quad \alpha_1 = \frac{K_1[\mathrm{H^+}]}{D}, \quad \alpha_2 = \frac{K_1K_2}{D}, \quad D = [\mathrm{H^+}]^2 + K_1[\mathrm{H^+}] + K_1K_2$$



Gráfica 2.3. *Diagrama de especiación del carbono inorgánico. A los pH del agua de mar domina el bicarbonato; cada curva cruza 0.5 en su pK_a.*

Ejemplo 2.2. El pH «natural» de la lluvia. Calcula el pH del agua pura en equilibrio con CO_2 a 419 ppm y 25 °C ($K_H = 3.4 \times 10^{-2}$ mol L⁻¹ atm⁻¹). $[\mathrm{CO_2(ac)}] = (3.4 \times 10^{-2})(419 \times 10^{-6}) = 1.42 \times 10^{-5}$ mol/L.

Como el ácido es débil y no hay otra fuente de H^+, $[H^+] \approx [HCO_3^-]$, así que $[H^+] = \sqrt{K_1[CO_2(ac)]} = \sqrt{(4.47 \times 10^{-7})(1.42 \times 10^{-5})} = 2.52 \times 10^{-6}$ mol/L. pH $= 5.60$.
Interpretación: la lluvia limpia es ligeramente ácida por el CO_2. Por eso se llama **lluvia ácida** a la que tiene pH menor que 5.6: la acidez extra proviene de H_2SO_4 y HNO_3 (Sección 2.5 y Capítulo 5).

¿Cómo absorbe el océano el CO_2 humano? El CO_2 que entra reacciona con el carbonato:

$$CO_2 + CO_3^{2-} + H_2O \rightarrow 2\,HCO_3^-$$

Esta reacción consume carbonato, lo que tiene dos consecuencias. Primero, la capacidad de absorción disminuye: el **factor de Revelle**, $R = (\Delta P_{CO_2}/P_{CO_2})/(\Delta CID/CID)$, vale alrededor de 10 en el océano superficial, así que un aumento de 10 % en el CO_2 del aire solo aumenta 1 % el CID. Segundo, el agua se acidifica: el pH superficial ha bajado unas 0.1 unidades desde la era preindustrial, lo que equivale a un aumento de alrededor de 26 % en $[H^+]$.

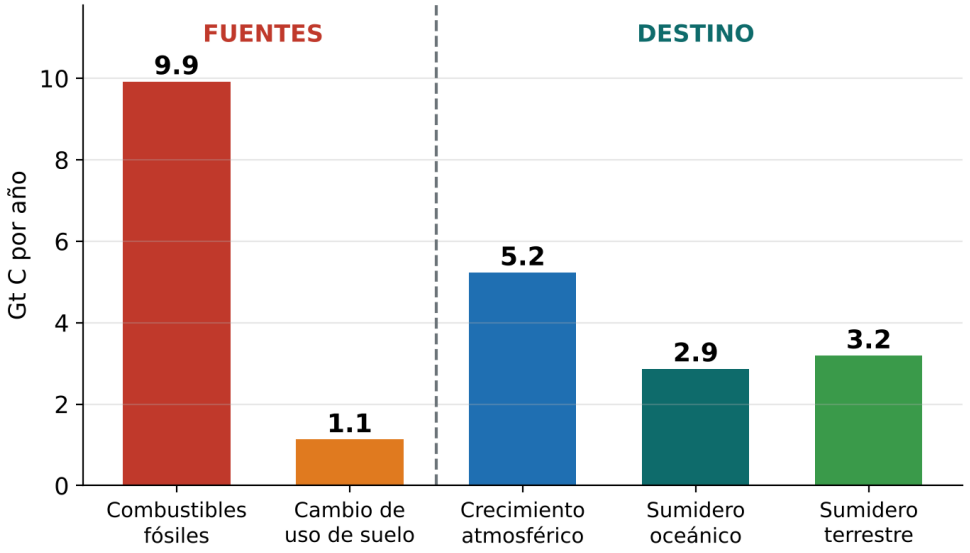
Error frecuente. Pensar que el océano absorbe CO_2 «sin límite» porque su reservorio es enorme. El intercambio con el océano profundo tarda siglos; a escala de décadas, solo la capa superficial (≈ 900 Gt C) responde, y su capacidad se reduce conforme se consume el carbonato.

El presupuesto de carbono humano

El Global Carbon Project publica cada año el balance de las emisiones humanas. Para el decenio 2014–2023:

$$E_{FOS} + E_{USO} = G_{ATM} + S_{OCÉANO} + S_{TIERRA} + B_{IM}$$

donde E son emisiones, G_{ATM} el crecimiento atmosférico, S los sumideros y B_{IM} el desequilibrio no explicado.



Gráfica 2.1. *Presupuesto global de carbono, promedio 2014–2023 (Friedlingstein et al., 2025). Las fuentes suman 11.0 Gt C/año; casi la mitad se queda en la atmósfera.*

Ejemplo 2.3. Fracción aerotransportada. Con los promedios 2014–2023 ($E_{\mathrm{FOS}} = 9.92$, $E_{\mathrm{USO}} = 1.13$, $G_{\mathrm{ATM}} = 5.23$ Gt C/año), calcula la fracción aerotransportada y el aumento anual de CO_2 en ppm.
$AF = G_{\mathrm{ATM}}/(E_{\mathrm{FOS}} + E_{\mathrm{USO}}) = 5.23/11.05 = 0.47$.
Aumento $= 5.23/2.124 = 2.46$ ppm/año.
Interpretación: de cada 100 toneladas de carbono emitidas, unas 47 se quedan en el aire y el resto lo absorben el océano y la vegetación. Si los sumideros se debilitan (por sequías o calentamiento del océano), la fracción aerotransportada sube.

Aplicación ambiental. Carbono azul en los manglares de México. México tiene el cuarto lugar mundial en extensión de manglar: 877 464 ha en 2025, según el monitoreo de la CONABIO, que registró una pérdida de 27 622 ha entre 2020 y 2025. Los manglares acumulan carbono en sedimentos anóxicos, donde la descomposición es lenta. Al talarlos para granjas acuícolas o desarrollos turísticos, ese carbono se oxida y regresa a la atmósfera como CO_2.

2.3 El ciclo del nitrógeno

La atmósfera es 78 % N_2, pero ese nitrógeno es casi inútil para los seres vivos: el triple enlace N≡N (945 kJ/mol) es de los más fuertes de la química. El ciclo del

nitrógeno consiste en romper ese enlace, mover el nitrógeno por varios estados de oxidación y finalmente devolverlo como N_2.

Estados de oxidación. El nitrógeno va de −3 a +5. La forma estable depende del oxígeno disponible: en ambientes óxicos domina el NO_3^- (+5); en anóxicos, el NH_4^+ (−3) o el N_2 (0).

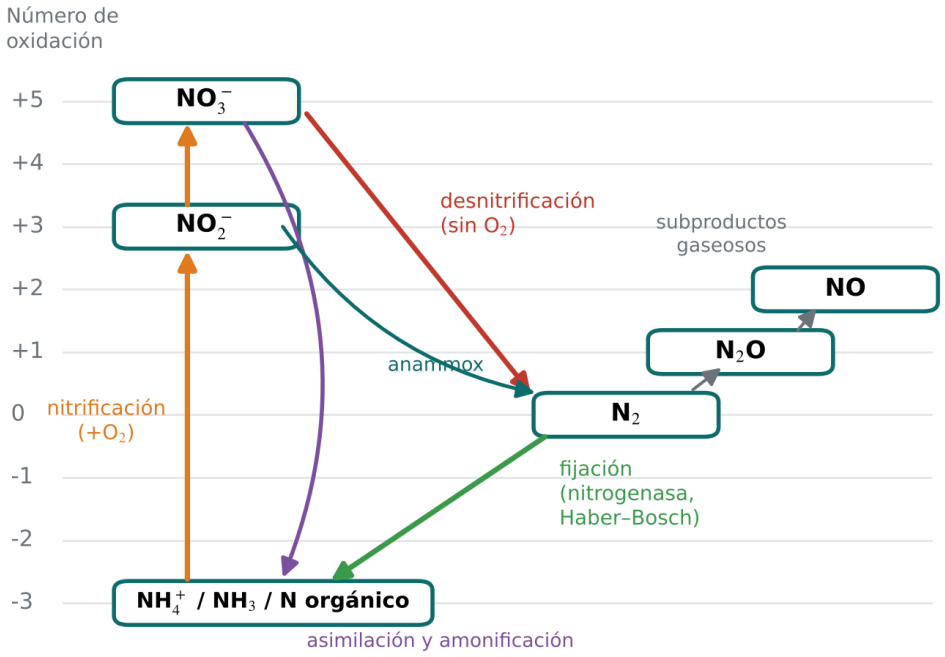


Figura 2.2. *Escalera de oxidación del nitrógeno. Las flechas hacia arriba son oxidaciones (requieren O_2); las flechas hacia abajo son reducciones.*

Ejemplo 2.4. Números de oxidación del nitrógeno. Asigna el número de oxidación del N en NH_4^+, N_2O, NO, NO_2^- y NO_3^- (H = +1, O = −2).
NH_4^+: $x + 4(+1) = +1 \Rightarrow x = -3$. N_2O: $2x + (-2) = 0 \Rightarrow x = +1$. NO: $x - 2 = 0 \Rightarrow x = +2$. NO_2^-: $x - 4 = -1 \Rightarrow x = +3$. NO_3^-: $x - 6 = -1 \Rightarrow x = +5$.
Interpretación: pasar de NH_4^+ a NO_3^- implica ceder 8 electrones por átomo de N. Por eso la nitrificación consume mucho oxígeno (Resuelto 2.2).

Procesos del ciclo.

Fijación biológica. Bacterias con la enzima nitrogenasa (*Rhizobium* en leguminosas, cianobacterias en el mar) reducen N_2 a NH_3 con un gran gasto de energía:

$$\mathrm{N_2 + 8\,H^+ + 8\,e^- + 16\,ATP \rightarrow 2\,NH_3 + H_2 + 16\,ADP + 16\,P_i}$$

Fijación industrial (Haber–Bosch). Desde 1913 se produce amoniaco a 400–500 °C y 150–300 bar con catalizador de hierro:

$$\mathrm{N_2 + 3\,H_2 \rightleftharpoons 2\,NH_3} \qquad \Delta H^\circ = -92.2\ \mathrm{kJ/mol}$$

Amonificación. Los descomponedores liberan el N orgánico como NH_4^+. El amonio está en equilibrio con el amoniaco ($pK_a = 9.25$), que es tóxico para los peces y volátil:

$$\mathrm{NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+}$$

Nitrificación (aerobia, en dos pasos realizados por distintos microorganismos):

$$\mathrm{NH_4^+ + 3/2\ O_2 \rightarrow NO_2^- + 2\,H^+ + H_2O}$$

$$\mathrm{NO_2^- + 1/2\ O_2 \rightarrow NO_3^-}$$

$$\text{Global:} \quad \mathrm{NH_4^+ + 2\,O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O}$$

Desnitrificación (anaerobia). Bacterias heterótrofas usan el nitrato como aceptor de electrones en lugar del O_2:

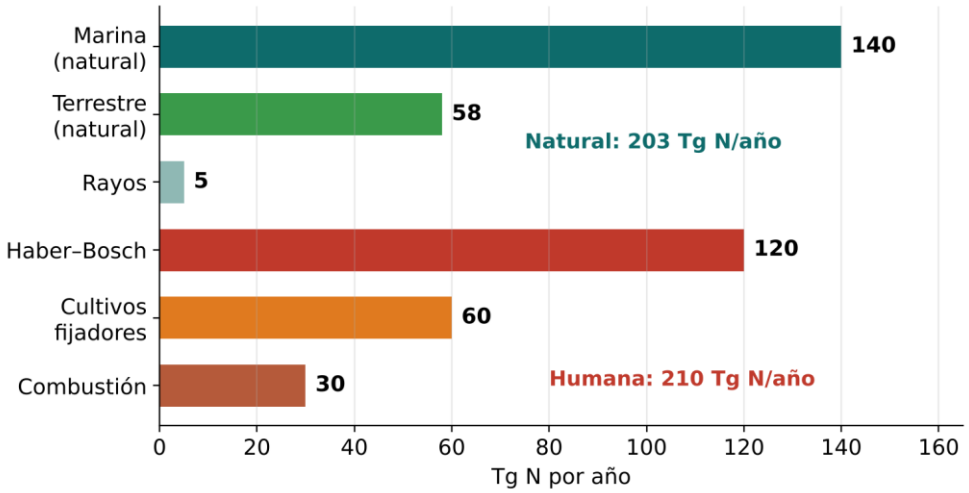
$$\mathrm{5\,CH_2O + 4\,NO_3^- + 4\,H^+ \rightarrow 2\,N_2 + 5\,CO_2 + 7\,H_2O}$$

Anammox (oxidación anaerobia del amonio), importante en sedimentos marinos y en plantas de tratamiento modernas:

$$\mathrm{NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2\,H_2O}$$

> **Para recordar.** La nitrificación y la desnitrificación pueden liberar N_2O, un gas de efecto invernadero unas 270 veces más potente que el CO_2 a 100 años y hoy la principal sustancia que destruye la capa de ozono emitida por los humanos (Capítulos 6 y 7).

La perturbación humana. Fowler et al. (2013) estiman que la fijación total es de 413 Tg N/año, de los cuales 210 son de origen humano. Es decir, los humanos ya fijamos tanto nitrógeno como toda la naturaleza junta.



Gráfica 2.2. *Fijación global de nitrógeno en Tg N/año, según Fowler et al. (2013). La fijación humana (Haber–Bosch, cultivos y combustión) supera a la natural terrestre y marina juntas.*

Aplicación ambiental. Nitrato en el Bajío. En zonas agrícolas intensivas como el Bajío, el fertilizante nitrogenado que no aprovechan los cultivos se nitrifica y el nitrato, muy soluble y poco retenido por el suelo, se lixivia al acuífero. Ese nitrato es el que mide el Resuelto 1.1. En el agua potable causa metahemoglobinemia en lactantes, por lo que la OMS fija un valor guía de 50 mg/L como NO_3^-.

2.4 El ciclo del fósforo

El fósforo forma parte del ADN, del ATP y de los fosfolípidos de las membranas. A diferencia del C, el N y el S, **no tiene una fase gaseosa importante**: es un ciclo sedimentario. El fósforo sale de las rocas por meteorización, circula en suelos, ríos y seres vivos, y termina enterrado en sedimentos marinos. Solo regresa a tierra cuando los movimientos tectónicos levantan esos sedimentos, en escalas de millones de años.

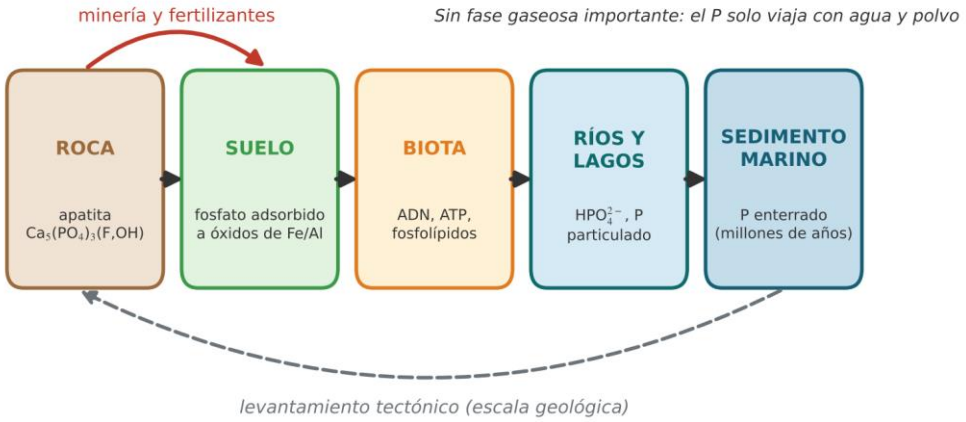


Figura 2.3. *Ciclo del fósforo. Es esencialmente de un solo sentido a escala humana: de la roca al sedimento marino. La minería acelera la primera etapa.*

Química del fosfato. La fuente principal es la apatita, $Ca_5(PO_4)_3(F,OH)$. En agua, el fosfato es un ácido triprótico (pK_a = 2.15, 7.20 y 12.35), por lo que a pH natural predominan $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}. Se adsorbe fuertemente a óxidos de hierro y aluminio y precipita con Ca^{2+}, así que se mueve poco en solución y mucho unido a partículas erosionadas.

El nutriente limitante. El fitoplancton tiene una composición promedio C:N:P = 106:16:1 (Redfield, 1958):

$$106\,CO_2 + 16\,NO_3^- + HPO_4^{2-} + 122\,H_2O + 18\,H^+ \rightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138\,O_2$$

Si en un lago la razón molar N:P disuelta es mayor que 16, el fósforo se acaba primero y limita el crecimiento; si es menor, limita el nitrógeno. En la mayoría de los lagos el fósforo es el nutriente limitante, y por eso su descarga desencadena la **eutrofización** (Capítulo 10).

> **Importante.** La razón de Redfield se aplica a moles, no a masa. En masa, 16 mol de N (224 g) por cada mol de P (31 g) dan N:P ≈ 7.2. Usar la razón en masa como si fuera molar cambia el diagnóstico.

Un recurso finito. El fósforo para fertilizantes se extrae de roca fosfórica. Según el USGS (2026), en 2025 se extrajeron unos 250 millones de toneladas y las reservas mundiales son de unos 73 000 millones de toneladas, de las cuales 50 000 millones están en Marruecos. México produjo unas 450 000 toneladas, principalmente en San Juan de la Costa, Baja California Sur.

Ejemplo 2.5. ¿Cuánto durarán las reservas de fosfato? Con reservas de 7.3×10^{10} t y producción de 2.5×10^{8} t/año, calcula la duración estática y la fracción en Marruecos.
Duración $= 7.3 \times 10^{10} / 2.5 \times 10^{8} = 292$ años. Fracción $= 50/73 = 0.68$.
Interpretación: el problema no es solo la cantidad sino la concentración geográfica: dos tercios de las reservas están en un solo país. Si la producción crece, la duración baja (Ejercicio propuesto 9). Recuperar fósforo de aguas residuales, por ejemplo como estruvita, es una respuesta de la química ambiental.

2.5 El ciclo del azufre

El azufre va de −2 (H_2S, sulfuros metálicos, aminoácidos como la cisteína) a +6 (sulfato). Como el nitrógeno, su forma depende del oxígeno: el sulfato domina en ambientes óxicos y el sulfuro en anóxicos.

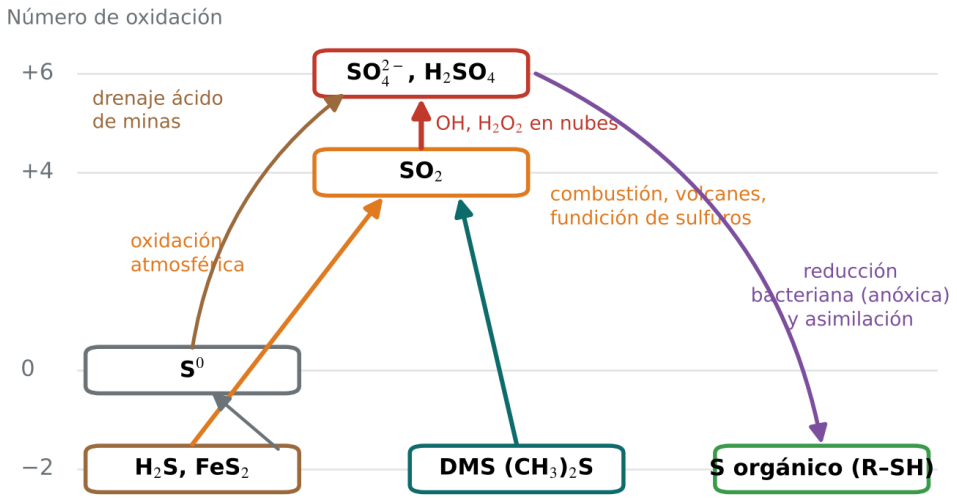


Figura 2.4. *Ciclo del azufre organizado por estado de oxidación. La atmósfera oxida las formas reducidas hasta sulfato; las bacterias de ambientes anóxicos lo reducen de nuevo.*

Fuentes naturales. El océano emite sulfuro de dimetilo (DMS), producido por el fitoplancton: unos 28 Tg S/año (Lana et al., 2011). Los volcanes emiten SO_2 y H_2S; el Popocatépetl es uno de los emisores volcánicos de SO_2 más constantes del mundo y su pluma llega con frecuencia a Puebla y al Valle de México.

Fuentes humanas. La combustión de carbón y combustóleo, y la fundición de minerales sulfurados (cobre, zinc, plomo) emiten SO_2. Smith et al. (2011) estiman que las emisiones globales de SO_2 fueron de unos 115 Tg SO_2 en 2005, comparables a todas las fuentes naturales.

Oxidación atmosférica. En fase gaseosa, el radical OH inicia la conversión de SO_2 a ácido sulfúrico:

$$\mathrm{SO_2 + HO^\bullet \xrightarrow{M} HOSO_2^\bullet}$$

$$\mathrm{HOSO_2^\bullet + O_2 \rightarrow HO_2^\bullet + SO_3}$$

$$\mathrm{SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4}$$

En las gotas de nube la vía más rápida es la oxidación por peróxido de hidrógeno:

$$\mathrm{HSO_3^- + H_2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + H^+ + H_2O}$$

En suelos y aguas. En sedimentos anóxicos, las bacterias sulfatorreductoras usan el sulfato para oxidar la materia orgánica y producen H_2S, responsable del olor a huevo podrido de los drenajes:

$$\mathrm{2\,CH_2O + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + 2\,HCO_3^-}$$

Al revés, cuando la pirita de una mina queda expuesta al aire y al agua se oxida y genera ácido:

$$\mathrm{FeS_2 + 7/2\ O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2\,SO_4^{2-} + 2\,H^+}$$

Ejemplo 2.6. Azufre en el combustible de los barcos. Desde 2020 la Organización Marítima Internacional limita el azufre del combustible marino a 0.5 % en masa (antes 3.5 %). ¿Cuánto SO_2 se evita por tonelada de combustible?
Masa de S: 35 kg (3.5 %) frente a 5 kg (0.5 %). Cada mol de S produce un mol de SO_2, así que la masa se multiplica por $M(\mathrm{SO_2})/M(\mathrm{S}) = 64.07/32.06 = 2.00$.
SO_2: 70 kg frente a 10 kg por tonelada; se evitan 60 kg (86 %).
Interpretación: el SO_2 se reduce en la misma proporción que el azufre del combustible. Es la misma lógica de la norma mexicana de calidad de combustibles y de la desulfuración del diésel.

Error frecuente. Olvidar que la masa cambia al pasar de S a SO_2. Una tonelada de azufre no produce una tonelada de SO_2 sino dos, porque el oxígeno aporta la mitad de la masa molar.

2.6 El ciclo del agua

El agua es el medio de transporte de casi todos los demás ciclos: disuelve nutrientes y contaminantes, erosiona rocas y lleva calor del ecuador a los polos. El ciclo lo impulsa la energía solar, que evapora agua sobre todo de los océanos.

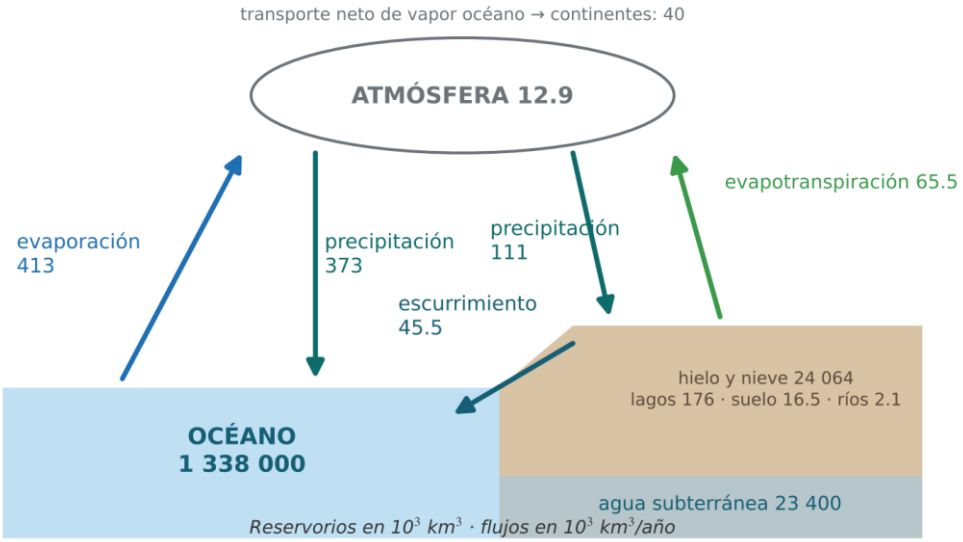


Figura 2.5. *Ciclo global del agua. Reservorios y flujos según Oki y Kanae (2006). El vapor que se evapora del mar y llueve sobre los continentes (40 × 10³ km³/año) es igual al escurrimiento que regresa por los ríos y el subsuelo.*

Reservorio	Volumen (10³ km³)	Porcentaje	Tiempo de residencia aproximado
Océanos	1 338 000	96.5 %	≈ 3200 años
Hielo y nieve	24 064	1.7 %	Miles de años
Agua subterránea	23 400	1.7 %	Décadas a milenios
Lagos	176	0.013 %	Años a siglos
Humedad del suelo	16.5	0.001 %	Semanas a meses
Atmósfera	12.9	0.001 %	≈ 10 días
Ríos	2.1	0.0002 %	≈ 2–3 semanas

Balance continental. Sobre los continentes llueven 111 × 10³ km³/año; se evapotranspiran 65.5 y escurren 45.5. La diferencia entre la evaporación oceánica (413) y la lluvia sobre el mar (373) es el vapor que el viento lleva a tierra (40). En estado estacionario ese vapor regresa al mar por los ríos y el agua subterránea.

Aplicación ambiental. El agua en México y en el Valle de México. Según la CONAGUA, en México llueven en promedio unos 770 mm al año y alrededor de 72 % de esa agua regresa a la atmósfera por evapotranspiración; solo el resto escurre o recarga los acuíferos. En el Valle de México se extrae más agua del acuífero de la que se recarga. Como resultado, las arcillas lacustres se compactan y la ciudad se hunde, en algunas zonas varias decenas de centímetros por año.

Para recordar. El agua dulce disponible es una fracción mínima del total: ríos y lagos suman menos de 0.02 %. Por eso los acuíferos, con tiempos de residencia largos, son vulnerables: un contaminante que llega a ellos puede tardar décadas en salir.

2.7 Perturbaciones humanas y acoplamiento de los ciclos

Los ciclos no son independientes. La fotosíntesis acopla el carbono con el nitrógeno y el fósforo (razón de Redfield); la desnitrificación oxida carbono orgánico; la lluvia ácida de azufre y nitrógeno libera metales y fósforo del suelo. Por eso perturbar un ciclo altera los otros.

Ciclo	Perturbación principal	Magnitud	Consecuencia	Capítulo
Carbono	Combustión fósil y deforestación	≈ 11 Gt C/año	Cambio climático, acidificación del océano	7, 8
Nitrógeno	Haber–Bosch, cultivos, combustión	210 Tg N/año	Eutrofización, smog, N_2O	5, 10
Fósforo	Minería de roca fosfórica	250 Mt de roca/año	Eutrofización de lagos y costas	10
Azufre	Combustión y fundición	≈ 115 Tg SO_2/año (2005)	Lluvia ácida, aerosoles	5
Agua	Extracción y represas	Acuíferos sobreexplotados	Hundimiento, escasez, salinización	8

Límites planetarios. Steffen et al. (2015) propusieron límites para la perturbación de los ciclos. Para el nitrógeno sugieren no fijar industrial e intencionalmente más de unos 62 Tg N/año; la cifra actual es de alrededor de 150. Para el fósforo, el flujo hacia el océano ya duplica el límite propuesto. Ambos ciclos están, según ese análisis, en la zona de alto riesgo.

Aplicación ambiental. La zona muerta del Golfo de México. Cada verano, frente a las costas de Luisiana se forma una zona hipóxica (O_2 < 2 mg/L) de miles de km² alimentada por el nitrógeno y el fósforo que arrastra el río Mississippi. El exceso de nutrientes produce fitoplancton; al morir, su descomposición consume el oxígeno del fondo. Es el acoplamiento N–P–C–O_2 en acción, y ocurre a escala más pequeña en presas mexicanas eutrofizadas, como Valle de Bravo.

Ecuaciones del capítulo

Ecuación	Para qué sirve	Sección
$dM/dt = \sum F_{\text{in}} - \sum F_{\text{out}}$	Balance de un reservorio	2.1
$\tau = M/F$	Tiempo de residencia	2.1
$M(t) = M_{ee} + (M_0 - M_{ee})e^{-t/\tau}$	Respuesta a una perturbación	2.1
$M_2/M_1 = k_{12}/k_{21}$	Estado estacionario de dos cajas	2.1
$\alpha_1 = K_1[\mathrm{H^+}]/D$	Especiación del carbonato	2.2
$[\mathrm{H^+}] = \sqrt{K_1 K_H P_{\mathrm{CO_2}}}$	pH de la lluvia limpia	2.2
$AF = G_{\text{ATM}}/(E_{\text{FOS}} + E_{\text{USO}})$	Fracción aerotransportada	2.2
1 ppm CO_2 = 2.124 Gt C	Conversión atmosférica	2.2
$\mathrm{NH_4^+ + 2\,O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O}$	Demanda de O_2 por nitrificación	2.3
C:N:P = 106:16:1 (molar)	Nutriente limitante	2.4

Ejercicios resueltos

Resuelto 2.1 (básico). Carbono en la atmósfera. En 2023 el CO_2 promedio global fue de 419.3 ppm; en la era preindustrial, de unos 278 ppm. Calcula el carbono atmosférico en ambos casos y el aumento.

1. **Datos:** $C_{2023} = 419.3$ ppm; $C_{\text{pre}} = 278$ ppm; factor 2.124 Gt C/ppm.
2. **Ecuación:** $M = 2.124\,C$.
3. **Sustitución:** $M_{2023} = 2.124 \times 419.3$; $M_{\text{pre}} = 2.124 \times 278$.
4. **Operaciones:** $M_{2023} = 890.6$; $M_{\text{pre}} = 590.5$; diferencia $= 300.1$.
5. **Unidades:** Gt C.
6. **Resultado:** 891 Gt C en 2023, 590 Gt C antes de la industria; el aumento es de 300 Gt C (+51 %).

7. **Interpretación:** el aumento equivale a unos 1100 Gt de CO_2 (×44.01/12.011). Es menos que lo emitido desde 1750, porque el océano y la vegetación absorbieron más de la mitad.

Resuelto 2.2 (básico). Demanda de oxígeno por nitrificación. Una planta de tratamiento descarga 200 L/s de efluente con 30 mg N/L de amonio. Calcula el oxígeno que consumiría su nitrificación completa en el río y la alcalinidad que destruiría.

1. **Datos:** $Q = 200$ L/s; $C_N = 30$ mg N/L; $M(\mathrm{O_2}) = 32.00$; $M(\mathrm{N}) = 14.01$; $M(\mathrm{CaCO_3})/2 = 50.04$ g/eq.
2. **Ecuaciones:** $\mathrm{NH_4^+ + 2\,O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O}$; demanda $= C_N \times (2 \times 32.00/14.01)$; alcalinidad $= C_N \times (2 \times 50.04/14.01)$.
3. **Sustitución:** $2 \times 32.00/14.01 = 4.57$ g O_2/g N; $2 \times 50.04/14.01 = 7.14$ g $CaCO_3$/g N.
4. **Operaciones:** $30 \times 4.57 = 137$ mg O_2/L; $Q = 200 \times 86\,400/1000 = 17\,280$ m³/d; $137 \times 17\,280/1000 = 2368$ kg/d; alcalinidad $= 30 \times 7.14 = 214$ mg/L como $CaCO_3$.
5. **Unidades:** kg O_2/d y mg/L como $CaCO_3$.
6. **Resultado:** unas 2.4 t de O_2 por día y 214 mg/L de alcalinidad.
7. **Interpretación:** el agua saturada de oxígeno contiene menos de 10 mg/L. Un efluente con amonio puede dejar sin oxígeno un río pequeño aunque no tenga materia orgánica. Por eso las normas limitan el nitrógeno amoniacal.

Resuelto 2.3 (intermedio). Tiempo de residencia del vapor de agua. La atmósfera contiene 12.9×10^3 km³ de agua. Recibe 413×10^3 km³/año del océano y 65.5×10^3 km³/año de los continentes. Calcula el tiempo de residencia.

1. **Datos:** $M = 12.9 \times 10^3$ km³; $F_{\mathrm{in}} = (413 + 65.5) \times 10^3$ km³/año.
2. **Ecuación:** $\tau = M/F$ (estado estacionario: entrada = salida).
3. **Sustitución:** $\tau = 12.9 \times 10^3 / 478.5 \times 10^3$.
4. **Operaciones:** $\tau = 0.02696$ años; $\times 365 = 9.84$ días.
5. **Unidades:** días.
6. **Resultado:** $\tau \approx 10$ días.

7. **Interpretación:** el agua del aire se renueva unas 37 veces al año. Por eso los contaminantes solubles (HNO_3, sulfato) se eliminan de la atmósfera en días por la lluvia, mientras que los insolubles (CO_2, CH_4) duran años.

Resuelto 2.4 (intermedio). Nutriente limitante en un lago. Un lago tiene 0.80 mg/L de N inorgánico disuelto y 0.020 mg/L de P como fosfato. ¿Cuál es el nutriente limitante y cuánto carbono algal podría formarse como máximo?

1. **Datos:** $C_N = 0.80$ mg/L; $C_P = 0.020$ mg/L; $M(\mathrm{N}) = 14.01$; $M(\mathrm{P}) = 30.97$; $M(\mathrm{C}) = 12.01$; C:N:P = 106:16:1.
2. **Ecuaciones:** $n = C/M$; comparar n_N/n_P con 16; $C_{\mathrm{alga}} = 106\, n_P\, M(\mathrm{C})$.
3. **Sustitución:** $n_N = 0.80/14.01$; $n_P = 0.020/30.97$.
4. **Operaciones:** $n_N = 0.0571$ mmol/L; $n_P = 6.46 \times 10^{-4}$ mmol/L; $n_N/n_P = 88$; $C_{\mathrm{alga}} = 106 \times 6.46 \times 10^{-4} \times 12.01 = 0.822$.
5. **Unidades:** adimensional y mg C/L.
6. **Resultado:** N:P = 88 > 16, así que limita el **fósforo**. Se pueden formar hasta 0.82 mg C/L de biomasa algal.
7. **Interpretación:** reducir el nitrógeno no ayudaría; la estrategia contra la eutrofización en este lago es controlar el fósforo (detergentes, aguas residuales, erosión agrícola).

Resuelto 2.5 (avanzado). Especiación del carbono en un río. Un río tiene pH 8.1 y CID = 2.0 mmol/L a 25 °C. Calcula la concentración de CO_2(ac), HCO_3^- y CO_3^{2-}.

1. **Datos:** $[\mathrm{H}^+] = 10^{-8.1} = 7.94 \times 10^{-9}$; $K_1 = 4.47 \times 10^{-7}$; $K_2 = 4.68 \times 10^{-11}$; CID = 2.0 mmol/L.
2. **Ecuaciones:** $D = [\mathrm{H}^+]^2 + K_1[\mathrm{H}^+] + K_1K_2$; α_i de la Sección 2.2; $[i] = \alpha_i \cdot \mathrm{CID}$.
3. **Sustitución:** $D = (7.94 \times 10^{-9})^2 + (4.47 \times 10^{-7})(7.94 \times 10^{-9}) + (4.47 \times 10^{-7})(4.68 \times 10^{-11})$.
4. **Operaciones:** $D = 6.31 \times 10^{-17} + 3.55 \times 10^{-15} + 2.09 \times 10^{-17} = 3.63 \times 10^{-15}$; $\alpha_0 = 0.0174$; $\alpha_1 = 0.977$; $\alpha_2 = 0.0058$.
5. **Unidades:** mmol/L.
6. **Resultado:** CO_2(ac) = 0.035; HCO_3^- = 1.95; CO_3^{2-} = 0.012 mmol/L.

7. **Interpretación:** el 98 % del carbono está como bicarbonato. El CO_2(ac) del río (0.035 mmol/L) es más del doble del de equilibrio con el aire (0.014 mmol/L, Ejemplo 2.2): el río está sobresaturado y desgasifica CO_2, lo que es habitual por la respiración en el agua y el suelo.

Ejercicios propuestos

Las respuestas numéricas están en el Apéndice C.

Básico

1. Expresa 1.0 ppm de CO_2 atmosférico en Gt C y en Gt CO_2.
2. Asigna el número de oxidación del N en N_2O_5, HNO_2, NH_2OH y N_2H_4, y del S en H_2S, $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} y SO_4^{2-}.
3. Un lago tiene 0.50 mg N/L y 0.050 mg P/L. ¿Cuál es el nutriente limitante?
4. Una termoeléctrica quema 1000 t/día de carbón con 1.2 % de azufre. ¿Cuántas toneladas de SO_2 emite al día si no tiene control?
5. Con los datos de la Figura 2.5, calcula el tiempo de residencia del agua en los ríos, en días.

Intermedio

6. Calcula el pH de la lluvia limpia con 278 ppm (preindustrial) y con 560 ppm de CO_2. ¿Cuánto cambia por cada duplicación de CO_2?
7. Un efluente de 50 L/s con 25 mg N/L de amonio llega a un río. Calcula la demanda de O_2 de su nitrificación en kg/d y la alcalinidad consumida.
8. En 2023, $E_{\mathrm{FOS}} = 10.31$, $E_{\mathrm{USO}} = 0.99$ y $G_{\mathrm{ATM}} = 5.93$ Gt C. Calcula la fracción aerotransportada y el aumento en ppm. Compárala con el promedio del decenio.
9. Si la producción de roca fosfórica crece 2 % al año, las reservas duran $t = \ln(1 + rR/P_0)/r$. Calcula t con $R = 7.3 \times 10^{10}$ t y $P_0 = 2.5 \times 10^{8}$ t/año, y compáralo con el Ejemplo 2.5.
10. Calcula el tiempo de residencia del agua en el océano respecto a la evaporación y compáralo con el de la atmósfera. ¿Cuántos órdenes de magnitud los separan?

Avanzado

11. En el sistema atmósfera–océano superficial preindustrial (589 y 900 Gt C) el intercambio bruto era de unos 60 Gt C/año en cada sentido. Calcula k_{12} y k_{21} y verifica que se cumple $M_2/M_1 = k_{12}/k_{21}$.

12. Demuestra que el pH de la lluvia limpia es $\mathrm{pH} = -1/2\log\left(K_1 K_H P_{\mathrm{CO_2}}\right)$ y que cambia 0.15 unidades por cada duplicación del CO_2.

13. Con la reacción de desnitrificación de la Sección 2.3, calcula los gramos de carbono orgánico necesarios para eliminar 1 g de N–NO_3^-. Si se usa metanol ($6\ NO_3^- + 5\ CH_3OH \rightarrow 3\ N_2 + 5\ CO_2 + 7\ H_2O + 6\ OH^-$), ¿cuántos gramos de metanol por gramo de N?

14. Con un factor de Revelle de 10 y CID = 2.05 mmol/kg, ¿cuánto aumenta el CID del océano superficial cuando el CO_2 atmosférico sube de 280 a 420 ppm? Discute por qué la aproximación lineal subestima o sobrestima el resultado.

Preguntas conceptuales

1. ¿Por qué el ciclo del fósforo se considera sedimentario y qué implica para su recuperación como recurso?

2. Explica la diferencia entre el tiempo de residencia de una molécula de CO_2 (≈ 4 años) y el tiempo de ajuste de una perturbación de CO_2 (siglos).

3. ¿Por qué el nitrato contamina los acuíferos con más facilidad que el amonio y el fosfato?

4. Si el océano absorbe CO_2, ¿por qué es un problema y no solo un beneficio?

5. ¿En qué ambientes esperarías encontrar H_2S y en cuáles sulfato? Relaciónalo con el oxígeno disponible.

6. Explica cómo la quema de combustibles fósiles perturba a la vez los ciclos del carbono, del nitrógeno y del azufre.

Interpretación de gráficas

1. **Gráfica 2.3.** Lee la fracción de CO_3^{2-} a pH 8.2 y a pH 8.1. ¿En qué porcentaje disminuye el carbonato con esa caída de pH? ¿Por qué importa para los corales y moluscos que forman $CaCO_3$?

2. **Gráfica 2.1.** Si el sumidero terrestre se redujera a la mitad por sequías y las emisiones se mantuvieran, ¿cuál sería el nuevo crecimiento atmosférico en Gt C y en ppm por año?

3. **Gráfica 2.4.** Ordena los gases de la gráfica según qué tan uniforme esperas que sea su concentración en el planeta. Justifica con los tiempos de residencia.

Problemas de aplicación

1. **Caso: presa de Valle de Bravo.** La presa abastece parte del Sistema Cutzamala y presenta florecimientos de cianobacterias. (a) Explica con la razón de Redfield cómo decidir qué nutriente controlar. (b) Propón tres fuentes de fósforo en su cuenca. (c) ¿Por qué un florecimiento puede producir olor a huevo podrido en el agua del fondo?

2. **Caso: el Popocatépetl y la Ciudad de México.** En una fase de actividad, el volcán emite 5000 t/día de SO_2. (a) Exprésalo en t de S por día y en kmol/día. (b) Escribe las reacciones que convierten ese SO_2 en H_2SO_4. (c) Explica por qué el sulfato puede llegar a la capital aunque el SO_2 tenga un tiempo de vida de pocos días.

3. **Caso: carbono azul en Campeche.** Un manglar acumula carbono en el sedimento a una tasa de 1.5 t C ha^{-1} $año^{-1}$. (a) ¿Cuánto CO_2 al año deja de capturarse si se pierden 13 600 ha? (b) Si cada hectárea talada además libera 300 t C del sedimento, ¿cuál es la emisión total? (c) Compáralo con las emisiones de un automóvil (unas 2 t CO_2/año).

Resumen del capítulo

- Los ciclos se describen con reservorios, flujos y tiempos de residencia ($\tau = M/F$). Un τ corto implica concentraciones muy variables; uno largo, mezcla global.

- El ciclo rápido del carbono es la fotosíntesis y la respiración; el océano almacena más de 40 veces el carbono de la atmósfera gracias al sistema de los carbonatos.
- Los humanos emiten unos 11 Gt C/año; el 47 % se queda en la atmósfera (+2.5 ppm/año) y el resto lo absorben el océano y la vegetación. El océano se acidifica.
- El nitrógeno va de −3 a +5; la nitrificación requiere O_2 y acidifica, y la desnitrificación ocurre sin O_2 y regresa el N_2. Los humanos ya fijan más nitrógeno que la naturaleza.
- El fósforo no tiene fase gaseosa; suele ser el nutriente limitante en lagos (N:P molar > 16) y es un recurso finito y concentrado geográficamente.
- El azufre se oxida en la atmósfera hasta H_2SO_4 (lluvia ácida) y se reduce a H_2S en ambientes anóxicos; la pirita expuesta genera drenaje ácido.
- El agua dulce accesible es menos del 0.02 % del total; la atmósfera la renueva cada 10 días y los acuíferos en décadas o milenios.
- Los ciclos están acoplados: perturbar uno altera los otros.

Glosario

Término	Definición
Amonificación	Liberación de NH_4^+ a partir del nitrógeno orgánico
Anammox	Oxidación anaerobia de amonio con nitrito para formar N_2
Apatita	Mineral de fosfato de calcio, fuente principal de P
Carbono azul	Carbono almacenado en ecosistemas costeros como manglares y pastos marinos
Desnitrificación	Reducción bacteriana de nitrato a N_2 en ausencia de O_2
DMS	Sulfuro de dimetilo, $(CH_3)_2S$, emitido por el fitoplancton
Eutrofización	Enriquecimiento de un cuerpo de agua con nutrientes que causa exceso de algas
Factor de Revelle	Cociente entre el cambio relativo de P_{CO_2} y el de CID en el agua de mar
Fijación de nitrógeno	Conversión de N_2 en formas reactivas (NH_3, NO_x)
Fracción aerotransportada	Parte de las emisiones de CO_2 que permanece en la atmósfera

Término	Definición
Meteorización	Alteración química de las rocas por agua, CO_2 y ácidos
Nitrificación	Oxidación biológica de NH_4^+ a NO_2^- y NO_3^- con O_2
Nutriente limitante	Nutriente que se agota primero y controla el crecimiento
Reservorio	Compartimento donde se almacena un elemento
Tiempo de ajuste	Tiempo para que una perturbación de un reservorio decaiga

Bibliografía recomendada

- Canadell, J. G. et al. (2021). Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. En *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC* (cap. 5). Cambridge University Press.
- Ciais, P. et al. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC* (cap. 6). Cambridge University Press.
- CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México* (varias ediciones). Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT.
- CONABIO. *Monitoreo de los manglares de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Fowler, D. et al. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368(1621), 20130164.
- Friedlingstein, P. et al. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17, 965–1039.
- Lana, A. et al. (2011). An updated climatology of surface dimethylsulfide concentrations and emission fluxes in the global ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 25, GB1004.
- Manahan, S. E. (2017). *Environmental Chemistry* (10.ª ed.). CRC Press.
- Oki, T. y Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068–1072.

- Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 205–221.
- Schlesinger, W. H. y Bernhardt, E. S. (2020). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (4.ª ed.). Academic Press.
- Smith, S. J. et al. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1101–1116.
- Steffen, W. et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.
- Stumm, W. y Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry* (3.ª ed.). Wiley.
- U.S. Geological Survey (2026). *Mineral Commodity Summaries 2026: Phosphate Rock*. USGS.