



DOCUMENTO TÉCNICO 12: CONCENTRACIÓN DE LAS DISOLUCIONES

El «*Vocabulario Científico y Técnico*» [Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1996] define el término **concentración** (*concentration*) como la relación entre la cantidad de **soluto** (*solute*) contenido en una **disolución** (*solution*) y la cantidad de esta o de **disolvente** (*solvent*). Esta definición es cualitativa, así que hay que utilizar otras fuentes de información. El «*Diccionario de Química Física*» [Costa, 2005] dice que la concentración es un grupo de cuatro magnitudes que caracterizan la composición de una mezcla respecto al volumen de la misma, a saber, **concentración en masa** (*mass concentration*), **concentración en cantidad de sustancia** (*amount concentration*), **concentración en volumen** (*volume concentration*) y **concentración en número** (*number concentration*). El avance respecto al «*Vocabulario Científico y Técnico*» es significativo. Pero la información más precisa aparece en la Norma UNE 82100–8:1996 (equivalente a la Norma Internacional ISO 31–8:1992), que propone ocho formas distintas para expresar la concentración. Siete de ellas también aparecen reflejadas en «*Quantities, units and symbols in physical chemistry*» [Cohen, 2007]. Se muestran, a continuación, esas definiciones; que son las únicas cuyo uso está, a día de hoy, permitido.

- **Concentración molecular de la sustancia B** (*number concentration, number density of entities*): número de moléculas de la sustancia B dividido por el volumen de la mezcla.

$$C_B = N_B/V \quad [C_B] = \text{m}^{-3}$$

También se puede utilizar el símbolo n_B , siempre que no se confunda con la cantidad de sustancia (*amount of substance, amount, chemical amount*). N_B es el símbolo para el número de entidades (*number of entities*) de B y V es el volumen de la mezcla.

- **Concentración másica de la sustancia B** (*mass concentration, mass density*): masa de la sustancia B dividida por el volumen de la mezcla.

$$\varrho_B = m_B/V \quad [\varrho_B] = \text{kg m}^{-3}$$

También se pueden utilizar los símbolos γ_B y ρ_B . m_B es la masa de la sustancia B.

- **Fracción másica de la sustancia B** (*mass fraction*): masa de la sustancia B dividida por la masa de la mezcla.

$$w_B = m_B / \sum_i m_i \quad [w_B] = 1$$

- **Concentración de la sustancia B** (*amount-of-substance concentration, amount concentration, concentration*): cantidad de la sustancia B dividida por el volumen de la mezcla.

$$c_B = n_B/V \quad [c_B] = \text{mol m}^{-3}$$

También se puede utilizar el símbolo $[B]$. Es muy habitual, cuando no hay ningún riesgo de confusión, referirse a esta cantidad simplemente como «concentración» (de B). También es frecuente utilizar como unidades mol dm^{-3} (mol L^{-1}). Una disolución 1 mol dm^{-3} se denomina disolución 1 molar y se representa

como 1 M (no es la letra mayúscula M, sino una letra en tipografía especial; una mayúscula cuya altura es equivalente a una minúscula). Así que M puede considerarse un símbolo para representar mol dm^{-3} . Otras unidades posibles son mmol dm^{-3} ($\equiv \text{mM}$, milimolar) y $\mu\text{mol dm}^{-3}$ ($\equiv \mu\text{M}$, micromolar). Debe evitarse llamar **molaridad** (hábito muy frecuente en la literatura) a esta cantidad, puesto que puede confundirse con la **molalidad**.

- **Fracción molar de la sustancia B** (*amount-of-substance fraction, amount fraction, mole fraction*): cociente entre la cantidad de sustancia B y la cantidad de sustancia de la mezcla.

$$x_B = n_B / \sum_i n_i \quad [x_B] = 1$$

- **Relación molar de la sustancia soluto B**: cociente entre la cantidad de sustancia del soluto B y la cantidad de sustancia del disolvente A.

$$r_B = n_B / n_A \quad [r_B] = 1$$

Esta definición es la única que no aparece en «*Quantities, units and symbols in physical chemistry*» [Cohen, 2007]

- **Fracción volumétrica de la sustancia B** (*volume fraction*): cociente entre el volumen de la sustancia B y la suma de volúmenes de todos los componentes de la mezcla.

$$\varphi_B = \frac{x_B V_{m,B}^*}{\sum_i x_i V_{m,i}^*} \quad [\varphi_B] = 1$$

También se puede utilizar el símbolo ϕ_B . Existe una definición alternativa en la que los volúmenes molares de los componentes puros se sustituyen por los volúmenes molares parciales. Por lo tanto, siempre será necesario explicitar la definición de esta magnitud antes de su uso.

- **Molalidad de la sustancia soluto B** (*molality*): cantidad de sustancia del soluto B en una disolución dividida por la masa del disolvente A.

$$m_B = n_B / m_A \quad [m_B] = \text{mol kg}^{-1}$$

También se puede utilizar el símbolo b_B , así se evita la posibilidad de confundir m_B con la masa de B. Una disolución 1 mol kg^{-1} se denomina disolución 1 molal y se representa como 1 m, pero no se puede usar el símbolo m en combinación con otras unidades.

Es posible encontrar las fracciones molares, las fracciones másicas y las fracciones volumétricas expresadas en **porcentajes** (%), aunque su uso está desaconsejado por la Normativa ISO. Si se utilizan, debe explicitarse con claridad a qué fracción (molar, másica o volumétrica) se refiere dicho porcentaje. Es decir, hay que escribir «una fracción másica igual a 0,5 %» o « $w = 0,5 \%$ ». No se debe escribir «0,5 % (m, m)». De todos modos, la legislación española (Real Decreto 363/1995) indica que «la expresión “%” se entenderá siempre como peso/peso¹, excepto si explícitamente se indica otra cosa». Antiguamente, la fracción másica porcentual se denominaba **porcentaje en peso** y se empleaba el **porcentaje en volumen** para la fracción volumétrica porcentual.

¹Se entiende masa/masa.

También es posible encontrar símbolos como ppm (**parte por millón**, *part per million*), ppb (**parte por billón**, *part per billion*), etc. Su uso vuelve a estar desaconsejado por muchas razones² y se recomienda utilizar unidades del Sistema Internacional: ppm debe sustituirse por $\mu\text{mol/mol}$ y ppb por nmol/mol .

Desgraciadamente, estas nomenclaturas obsoletas siguen apareciendo, con bastante frecuencia, en el trabajo diario de laboratorio y, por lo tanto, su conocimiento es necesario.

Se incluyen, a continuación, un conjunto de ejercicios en el que se manejan bastantes de las cantidades descritas para expresar la concentración.

Ejemplos prácticos

1. Se disuelven 7,0 g de cloruro sódico (NaCl) en 43 g de agua (H_2O). Calcula la fracción másica y el porcentaje en peso de NaCl en dicha disolución.

$$\text{Fracción másica de NaCl} \rightarrow w(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{m(\text{NaCl}) + m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{7,0 \text{ g}}{7,0 \text{ g} + 43 \text{ g}} = 0,14$$

$$\text{Porcentaje en peso de NaCl} = 100 \times w(\text{NaCl}) = 100 \times 0,14 = 14 \%$$

2. Una disolución acuosa de etanol ($\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{OH}$) al 20 % presenta una densidad de $0,967 \text{ g cm}^{-3}$. Calcula la concentración másica de etanol en dicha disolución. *Nota:* Es costumbre habitual en química representar el etanol como EtOH .

La densidad de la disolución está expresada en $\text{g cm}^{-3} \equiv \text{g mL}^{-1}$. En primer lugar, se convierten esas unidades al Sistema Internacional.

$$\rho(\text{disolución}) = 0,967 \frac{\text{g disolución}}{\text{mL disolución}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 967 \frac{\text{kg disolución}}{\text{m}^3 \text{ disolución}}$$

Ahora ya se puede calcular la concentración másica de etanol. Como no se explicita otra cosa, se entiende que el 20 % es un porcentaje en peso.

$$\varrho(\text{EtOH}) = \frac{m(\text{EtOH})}{V} = \frac{967 \text{ kg disolución} \times \frac{20 \text{ kg EtOH}}{100 \text{ kg disolución}}}{1 \text{ m}^3 \text{ disolución}} = 193,4 \frac{\text{kg EtOH}}{\text{m}^3 \text{ disolución}}$$

3. ¿A cuántas ppm equivale una concentración de hierro (Fe) del 0,000 5 %?

$$10^6 \text{ g disolución} \times \frac{0,000 5 \text{ g Fe}}{100 \text{ g disolución}} = 5 \text{ ppm}$$

4. El ácido sulfúrico comercial viene etiquetado como: H_2SO_4 (95 – 98 %, $\rho = 1,840 \text{ g mL}^{-1}$). ¿Cuál es su concentración?

Se calcula, en primer lugar, la densidad del ácido sulfúrico comercial en unidades del Sistema Internacional. Y a continuación, la masa molecular relativa del H_2SO_4 .

$$\rho(\text{comercial}) = 1,840 \frac{\text{g comercial}}{\text{mL comercial}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 1840 \frac{\text{kg comercial}}{\text{m}^3 \text{ comercial}}$$

²El billón y el trillón americanos se corresponden con 10^9 y 10^{12} , pero en otras partes del mundo se utiliza 10^{12} para el billón y 10^{18} para el trillón; el símbolo ppt se puede interpretar como partes por trillón o partes por mil; y así sucesivamente.

$$M_r(\text{H}_2\text{SO}_4) = 2 \times A_r(\text{H}) + A_r(\text{S}) + 4 \times A_r(\text{O}) = 2 \times 1,0079 + 32,064 + 4 \times 15,999 = 98,08$$

Con estos datos preparados, se calcula $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = n(\text{H}_2\text{SO}_4)/V$, la concentración de H_2SO_4 .

$$c(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98,08 \cdot 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{SO}_4} \times \frac{95 \text{ kg H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ kg disolución}} \times \frac{1\,840 \text{ kg disolución}}{1 \text{ m}^3 \text{ disolución}} = 17,82 \cdot 10^3 \frac{\text{mol H}_2\text{SO}_4}{\text{m}^3 \text{ disolución}}$$

$$[\text{H}_2\text{SO}_4] = 17,82 \cdot 10^3 \frac{\text{mol H}_2\text{SO}_4}{\text{m}^3 \text{ disolución}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ disolución}}{1\,000 \text{ L disolución}} = 17,82 \frac{\text{mol H}_2\text{SO}_4}{\text{L disolución}} = 17,82 \text{ M}$$

Se podría haber hecho el cálculo de la concentración directamente, utilizando unidades más adecuadas a las circunstancias (aunque no pertenezcan al SI).

$$[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0,95 \frac{\text{g H}_2\text{SO}_4}{\text{g disolución}} \times \frac{1\,840 \text{ g disolución}}{1 \text{ L disolución}} \times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98,08 \text{ g H}_2\text{SO}_4} = 17,82 \text{ M}$$

Hay que repetir el cálculo para el otro porcentaje en peso.

$$[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0,98 \frac{\text{g H}_2\text{SO}_4}{\text{g disolución}} \times \frac{1\,840 \text{ g disolución}}{1 \text{ L disolución}} \times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98,08 \text{ g H}_2\text{SO}_4} = 18,38 \text{ M}$$

$$[\text{H}_2\text{SO}_4] \text{ comercial } (95 - 98 \%, \rho = 1,840 \text{ g mL}^{-1}) = (17,82 + 18,38)/2 = 18,1 \text{ M}$$

5. El ácido clorhídrico comercial viene etiquetado como: HCl (37 %, $\rho = 1,190 \text{ g mL}^{-1}$). ¿Cuál es su concentración?

$$[\text{HCl}] = 0,37 \frac{\text{g HCl}}{\text{g disolución}} \times \frac{1\,190 \text{ g disolución}}{1 \text{ L disolución}} \times \frac{1 \text{ mol HCl}}{36,5 \text{ g HCl}} = 12,06 \text{ M}$$

$$[\text{HCl}] \text{ comercial } (37 \%, \rho = 1,190 \text{ g mL}^{-1}) = 12,06 \text{ M}$$

6. En 35,00 g de agua se disuelven 5,00 g de HCl . La densidad de la disolución resultante es, a 20 °C, $1,060 \text{ g cm}^{-3}$. Calcula el porcentaje en peso de HCl en dicha disolución. Calcula también la concentración de la misma.

$$\text{Porcentaje en peso de HCl} \rightarrow 100 \times w(\text{HCl}) = 100 \times \frac{m(\text{HCl})}{m(\text{HCl}) + m(\text{H}_2\text{O})} = 100 \times \frac{5,00 \text{ g}}{5,00 \text{ g} + 35,00 \text{ g}} = 12,50 \%$$

$$[\text{HCl}] = 0,1250 \frac{\text{g HCl}}{\text{g disolución}} \times \frac{1060 \text{ g disolución}}{1 \text{ L disolución}} \times \frac{1 \text{ mol HCl}}{36,5 \text{ g HCl}} = 3,633 \text{ M}$$

7. Dispones de una disolución acuosa que, a 25 °C, contiene 27,0 g de sacarosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) en cada 200 mL de disolución. Calcula la concentración y la molalidad de dicha disolución. Dato: A esa temperatura, la densidad de la disolución es $1,05 \text{ g mL}^{-1}$.

Se calcula, en primer lugar, la masa molar de la sacarosa a partir de las masas molares de los átomos: $M(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 342,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$. Ahora ya se puede calcular la concentración.

$$[\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}] = \frac{5 \times 27,0 \text{ g C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \times \frac{1 \text{ mol C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}{342,0 \text{ g C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}}{1 \text{ L}} = 0,394 \text{ M}$$

Para calcular la molalidad hay que conocer la masa de disolvente. La densidad de la disolución permite averiguar ese dato.

$$\rho(\text{disolución}) = 1,05 \text{ g mL}^{-1} \rightarrow 1 \text{ L disolución} \equiv 1,05 \cdot 10^3 \text{ g}$$

$$1,05 \cdot 10^3 \text{ g disolución} - 5 \times 27,0 \text{ g C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} = 915 \text{ g H}_2\text{O}$$

$$b(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = \frac{5 \times 27,0 \text{ g C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \times \frac{1 \text{ mol C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}{342,0 \text{ g C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}}{0,915 \text{ kg H}_2\text{O}} = 0,431 \text{ mol kg}^{-1}$$

8. ¿Cuál será la fracción molar de metanol ($\text{CH}_3\text{--OH}$) en una disolución acuosa que simultáneamente es 2,14 molal en metanol y 3,86 molal en etanol ($\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{--OH}$)?

Se calcula la masa molar del agua a partir de las masas molares de los átomos: $M(\text{H}_2\text{O}) = 18,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$. Si una disolución es, simultáneamente, 2,14 mol kg^{-1} en metanol y 3,86 mol kg^{-1} en etanol, eso significa que hay 2,14 mol de metanol y 3,86 mol de etanol por cada kg de H_2O . Ahora bien, ¿cuántos moles de H_2O hay en 1 kg de H_2O ?

$$1 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{O}}{18,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{O}} = 55,506 \text{ mol H}_2\text{O}$$

Por lo tanto, ya se ha obtenido la composición (en moles) de la mezcla: 55,506 mol de H_2O , 2,14 mol de etanol y 3,86 mol de etanol. Ahora ya se puede calcular la fracción molar solicitada.

$$x(\text{etanol}) = \frac{2,14}{55,506 + 2,14 + 3,86} = 0,0348$$

9. Calcula la molalidad de una disolución acuosa de un vinagre que es 0,763 M en ácido acético. La densidad de la disolución es $1,004 \text{ g mL}^{-1}$.

Se calcula la masa molar del ácido acético a partir de las masas molares de los átomos que lo componen: $M(\text{CH}_3\text{COOH}) = 60,05 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$. Se utiliza la densidad de la disolución (y la información que aporta la concentración) para obtener la masa de disolvente.

$$\rho(\text{disolución}) = 1,004 \text{ g mL}^{-1} \rightarrow 1 \text{ L disolución} \equiv 1004 \text{ g}$$

$$1004 \text{ g disolución} - 0,763 \text{ mol CH}_3\text{COOH} \times \frac{60,05 \text{ g CH}_3\text{COOH}}{1 \text{ mol CH}_3\text{COOH}} = 958,18 \text{ g H}_2\text{O}$$

Ahora ya es posible calcular la molalidad.

$$b(\text{CH}_3\text{COOH}) = \frac{0,763 \text{ mol CH}_3\text{COOH}}{0,95818 \cdot 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{O}} = 0,796 \text{ mol kg}^{-1}$$

10. Se añaden 6,0 g de cloruro potásico (KCl) a 80 g de una disolución de KCl al 12 %. Calcula el porcentaje en peso de KCl de la nueva disolución.

$$\text{Porcentaje en peso de KCl} \rightarrow 100 \times w(\text{KCl}) = 100 \times \frac{m(\text{KCl})}{m(\text{KCl}) + m(\text{H}_2\text{O})} = 100 \times \frac{6,00 + 80 \times 0,12}{86} = 18,14 \%$$

11. Dispones de una disolución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 %, cuya densidad es $1,00 \text{ g mL}^{-1}$. ¿Cuántos mililitros se deben tomar, de dicha disolución, para preparar 1 litro de una nueva disolución 3,6 M?

$$3,6 \text{ mol H}_2\text{O}_2 \times \frac{34,0138 \text{ g H}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol H}_2\text{O}_2} \times \frac{100 \text{ g disolución}}{30 \text{ g H}_2\text{O}_2} \times \frac{100 \text{ mL disolución}}{100 \text{ g disolución}} = 408,16 \text{ mL disolución}$$

Una vez depositados los 408,16 mL en un matraz aforado de 1 L, se procede a enrasar, añadiendo agua destilada, hasta alcanzar la línea de enrase.

12. Se necesitan 6,5 g de tricloruro de hierro (FeCl_3). Dispones de una disolución de tricloruro de hierro al 5,0 % de dicha sal. ¿Qué masa de la disolución se necesita?

$$6,5 \text{ g FeCl}_3 \times \frac{100 \text{ g disolución}}{5,0 \text{ g FeCl}_3} = 1,3 \cdot 10^2 \text{ g disolución}$$

13. ¿Qué volumen de agua habrá que añadir a 100 mL de una disolución acuosa de ácido sulfúrico, con una riqueza del 26,0 % y una densidad de $1,19 \text{ g mL}^{-1}$, para obtener una disolución 1,50 M? *Nota:* Supón que la **disolución es ideal**.

Como siempre, para empezar, se calcula la masa molar del ácido sulfúrico a partir de las masas molares de los átomos: $M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98,076 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$. El problema pide que se añada agua a una disolución inicial de ácido sulfúrico. Eso significa que la cantidad de ácido sulfúrico de la disolución no cambiará. Hay que calcular cuál es esa cantidad de ácido sulfúrico. Para ello se utilizarán los datos de densidad y porcentaje en peso de la disolución que proporciona el enunciado del problema.

$$100 \text{ mL disolución} \times \frac{1,19 \text{ g disolución}}{1 \text{ mL disolución}} \times \frac{26,0 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ g disolución}} \times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{98,076 \text{ g H}_2\text{SO}_4} = 0,315 \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$

Ahora ya se puede plantear la ecuación que permite resolver el problema.

$$1,50 \text{ M} = \frac{0,315 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{(100 + x) \times 10^{-3} \text{ L}} \rightarrow x = 110 \text{ mL}$$

Sobre los 100 mL de la disolución inicial hay que añadir 110 mL de agua (bajo el supuesto de idealidad de la mezcla).

14. ¿Qué volumen, en mL, de una disolución acuosa de ácido sulfúrico de densidad $1,84 \text{ g mL}^{-1}$ y 96,0 % en peso (disolución A) será necesario extraer para preparar 100 mL de una disolución al 20,0 % en peso y densidad $1,14 \text{ g mL}^{-1}$ (disolución B)?

El problema puede resolverse utilizando factores de conversión.

$$100 \text{ mL dis. B} \times \frac{1,14 \text{ g dis. B}}{1 \text{ mL dis. B}} \times \frac{20 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ g dis. B}} \times \frac{100 \text{ g dis. A}}{96,0 \text{ g H}_2\text{SO}_4} \times \frac{1 \text{ mL dis. A}}{1,84 \text{ g dis. A}} = 12,9 \text{ mL dis. A}$$

Una vez depositados los 12,9 mL en un matraz aforado de 100 mL, se enrasa, añadiendo agua destilada, hasta alcanzar la línea de enrase.

15. ¿Cómo se podrán preparar 200 mL de una disolución acuosa 1,00 M en ácido sulfúrico (disolución B) a partir de otra del mismo ácido 1,22 M (disolución A)?

De nuevo es posible utilizar factores de conversión.

$$200 \text{ mL dis. B} \times \frac{1,00 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{1000 \text{ mL dis. B}} \times \frac{1000 \text{ mL dis. A}}{1,22 \text{ mol H}_2\text{SO}_4} = 164 \text{ mL dis. A}$$

Así pues, basta mezclar 164 mL de la disolución A (el ácido sulfúrico 1,22 M) con agua suficiente hasta completar un volumen total de 200 mL.
