Fenolftaleína en condiciones extremas · Carlos Moreno Borrallo

Esta experiencia ha sido galardonada con una MENCIÓN DE HONOR en la categoría Demostraciones de Química de los Premios a la Labor Docente en el Fomento de la Experimentación en Física y Química.

La fenolftaleína es probablemente uno de los indicadores ácido-base más conocidos en la enseñanza de la química. La explicación que habitualmente recibe el alumnado es sencilla: es incolora en medio ácido y rosa en medio básico. Sin embargo, esta afirmación solo es válida dentro de un intervalo determinado de condiciones químicas. Cuando la fenolftaleína se somete a medios extremadamente básicos, el característico color rosa desaparece y la disolución vuelve a hacerse incolora. En el extremo contrario, cuando se introduce en ácido sulfúrico concentrado, deja de ser incolora y aparece una llamativa coloración naranja o rojo-anaranjada. Esta experiencia pretende aprovechar ese comportamiento inesperado para mostrar una de las ideas fundamentales de la química: las propiedades macroscópicas de una sustancia dependen de su estructura molecular y de la distribución de sus electrones. El color no es, por tanto, una propiedad inmutable de la fenolftaleína. Cada medio químico favorece una estructura diferente, con distinto grado de conjugación y deslocalización electrónica. La experiencia conecta de manera visual conceptos de química orgánica, equilibrio ácido-base, estructura molecular, espectroscopía y química analítica con la historia de la farmacia.

La presente demostración experimental tiene por objetivos:

- Comprobar experimentalmente que el comportamiento de la fenolftaleína es más complejo que el modelo escolar «incolora en ácido / rosa en base».
- Relacionar los diferentes colores observados con las distintas estructuras moleculares de la fenolftaleína.
- Explicar el papel de la conjugación y de la deslocalización electrónica en la aparición del color.
- Mostrar cómo condiciones químicas extremas pueden generar especies diferentes a las observadas en las condiciones habituales de laboratorio.
- Introducir las limitaciones del concepto convencional de pH cuando se trabaja con ácidos muy concentrados.

Fundamento

¿Por qué vemos color?

Una molécula presenta color cuando absorbe determinadas longitudes de onda de la región visible del espectro electromagnético. En las moléculas orgánicas, esta absorción está frecuentemente relacionada con la existencia de sistemas conjugados: secuencias de orbitales p que pueden interaccionar entre sí y permitir que determinados electrones se encuentren deslocalizados sobre una región extensa de la molécula. Cuando la conjugación se extiende, la separación energética entre determinados estados electrónicos puede disminuir hasta corresponder a la energía de fotones de la región visible. La

molécula absorbe entonces ciertas longitudes de onda y observamos el color complementario de la radiación absorbida.

Las cuatro formas estructurales de la fenolftaleína

En medio ácido o neutro: H_2In

Forma lactónica cerrada – INCOLORA

En medios ácidos, neutros y ligeramente básicos, la fenolftaleína se encuentra predominantemente en su forma lactónica, que puede representarse como H_2In. El anillo lactona permanece cerrado y la geometría del carbono central impide que los sistemas aromáticos formen un único sistema conjugado extenso. La deslocalización electrónica queda limitada y la molécula no absorbe significativamente en la región visible.

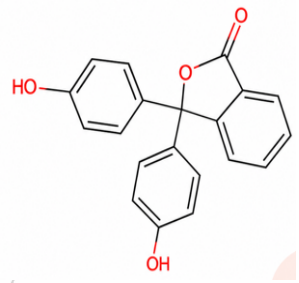


Figura 1. Forma H_2In.

H_2In → forma lactónica cerrada → conjugación limitada → incolora.

En medio básico moderado: In^{2-}

Forma quinoide dianiónica – ROSA/FUCSIA

Al aumentar la basicidad, la fenolftaleína pierde protones de sus grupos fenólicos y se produce una reorganización estructural. Se forma predominantemente una especie dianiónica que puede representarse mediante distintas estructuras resonantes, entre ellas una importante forma quinoide. Esta estructura permite una deslocalización electrónica mucho más extensa y aparece el característico color rosa-fucsia.

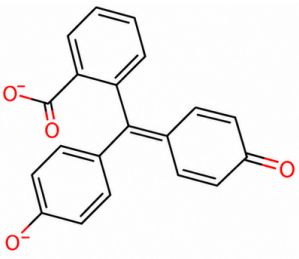


Figura 2. Forma In^{2-}.

$H_2In \rightleftharpoons In^{2-}$ → forma quinoide conjugada → rosa/fucsia

En medio fuertemente básico: $In(OH)^{3-}$

Forma carbinol o pseudobase – INCOLORA

Si la concentración de hidróxido aumenta mucho, un ion OH^- puede adicionarse al carbono central de la especie coloreada. Ese carbono pasa a una geometría aproximadamente sp^3 y se forma la especie carbinol o pseudobase, $In(OH)^{3-}$. El nuevo centro sp^3 interrumpe la comunicación electrónica entre los sistemas aromáticos y se pierde la extensa conjugación responsable del color.

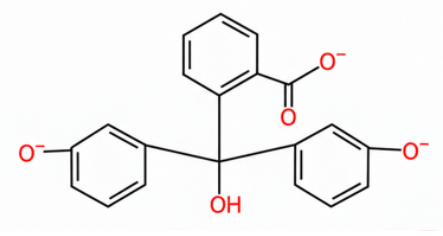


Figura 3. Forma $In(OH)^{3-}$.

$In^{2-}+OH^- \rightleftharpoons In(OH)^{3-}$ → pérdida conjugación → incolora

En ácido sulfúrico concentrado: H_3In^+
Forma catiónica — NARANJA/ROJO-ANARANJADA
En ácido sulfúrico concentrado, la fenolftaleína se encuentra en un medio de acidez extrema. Tras protonación de la lactona se produce apertura del anillo y se genera una especie catiónica que puede describirse como un catión triphenylmethyl (tritilio) estabilizado por resonancia. La deslocalización electrónica se extiende de nuevo y la absorción se desplaza a la región visible, originando una coloración naranja o rojo-anaranjada.

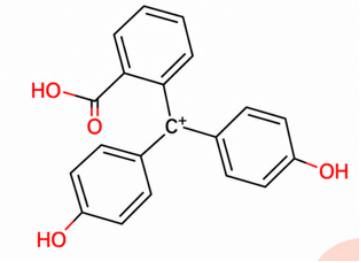


Figura 4. Forma H_3In^+.

$H_2In + H^+ \rightleftharpoons H_3In^+ \rightarrow$ catión conjugado estabilizado por resonancia → naranja/rojo-anaranjada.

Materiales

- 4 tubos de ensayo de vidrio resistente.
- Vasos de precipitados.
- Varillas de vidrio.
- Recipientes específicos para residuos ácidos y básicos.

Reactivos

Fenolftaleína al 1 % en etanol

- Agua destilada
- Hidróxido sódico
- Ácido sulfúrico concentrado, aproximadamente 95–98 %

Procedimiento experimental

Experimento A — Fenolftaleína en agua

1. Introducir aproximadamente 5 mL de agua destilada en un tubo.
2. Añadir 2–3 gotas de disolución de fenolftaleína.
3. Observar y registrar el color.
4. Resultado esperado: la disolución permanece incolora. Predomina la forma lactónica H_2In.

Experimento B — Medio básico habitual

1. Introducir aproximadamente 5 mL de NaOH 0,1 M en un segundo tubo.
2. Añadir 2–3 gotas de fenolftaleína.
3. Agitar suavemente y observar.
4. Resultado esperado: aparece inmediatamente una intensa coloración rosa/fucsia. Predomina la especie dianiónica In^{2-}.

Experimento C — Medio fuertemente básico

1. Introducir unos 5 mL de NaOH concentrado (aprox. 4 M) en un tubo.
2. Añadir unas gotas de fenolftaleína.
3. Observar inicialmente la aparición de color.
4. Dejar reposar y comparar con la muestra de NaOH diluido.
5. Resultado esperado: la coloración rosa disminuye progresivamente hasta desaparecer o quedar muy atenuada, por formación de la especie carbinol $In(OH)^{3-}$.

Experimento D — Medio de acidez extrema

1. Realizar exclusivamente por el docente y en campana extractora.
2. Introducir aproximadamente 1 mL de ácido sulfúrico concentrado en un tubo seco y resistente.
3. Añadir con pipeta una sola gota de fenolftaleína etanólica al 1 %.
4. No agitar violentamente. Observar inmediatamente el cambio de color.
5. Resultado esperado: aparece una coloración naranja o rojo-anaranjada asociada a la especie protonada H_3In^+.



Carlos Moreno Borrallo
Agora International School (Andorra)
Contacto: carlos.moreno@agoraandorra.com