

Ilumínate con química: un proyecto dentro del programa Bachillerato de Excelencia

Enlighten yourself with chemistry: a project within Baccalaureate of Excellence program

Ana M. del Hoyo Martín

IES Francisco Umbral, Ciempozuelos, Madrid.

PALABRAS CLAVE:

Cuántica
Fosforescencia
Fluorescencia
Quimioluminiscencia
Luz

RESUMEN:

El Bachillerato de Excelencia es un programa que permite a los alumnos profundizar y llevar a cabo un proyecto de investigación permitiendo que entren en contacto con el mundo científico. La luz es un fenómeno físico que se encuentra directamente relacionado con la química y que se puede estudiar fácilmente a través de sustancias presentes en nuestra vida cotidiana. A través de elementos como la tónica, la cúrcuma o las barras luminiscentes se puede abordar el estudio de diferentes fenómenos luminiscentes, como son fluorescencia, fosforescencia y quimioluminiscencia, al mismo tiempo que permite conocer a relevancia histórica de la química cuántica. Además, el trabajo experimental posibilita que los estudiantes adquieran competencias y destrezas para la aplicación del método científico.

KEYWORDS:

Quantum
Phosphorescence
Fluorescence
Chemiluminescence
Light

ABSTRACT:

The Baccalaureate of Excellence is a program that allows students to deepen and carry out a research project allowing them to come into contact with the scientific world. Light is a physical phenomenon that is directly related to chemistry and can be easily studied through substances present in our daily lives. Through elements such as tonic, turmeric or luminescent bars, different luminescent phenomena can be studied, such as fluorescence, phosphorescence and chemiluminescence, while at the same time providing knowledge of the historical relevance of quantum chemistry. In addition, experimental work enables students to acquire competences and skills for the application of the scientific method.

Introducción

La relación entre química y luz ha estado presente a lo largo de la historia, tanto en el desarrollo de la ciencia como en la vida cotidiana,^[1] desde los alquimistas, los antiguos filósofos, pasando por Newton, hasta el desarrollo de la espectroscopía y la teoría cuántica.^[2]

El desarrollo de la física cuántica nació a partir de tres fenómenos que no explicaba la física clásica: la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y los espectros atómicos. Es este último fenómeno, el de los espectros atómicos, el que dio lugar al desarrollo del modelo de Bohr, el cual relaciona los saltos energéticos entre las órbitas con los espectros de absorción (cuando un electrón absorbe energía para pasar desde el estado fundamental a un estado excitado) y de emisión (cuando un electrón emite energía desde un estado excitado al estado fundamental) de un átomo (Fig. 1).

Luminiscencia: Fosforescencia, fluorescencia y quimioluminiscencia

La luminiscencia (capacidad de emitir luz) de moléculas complejas se puede emplear para relacionar contenidos de 2º de Bachillerato,^[3] como son los espectros atómicos y el enlace covalente, con el concepto de orbital molecular. De esta manera,



Figura 1. Diagrama de energía y espectros atómicos de absorción y emisión.

los estudiantes podrán comprender que las moléculas interactúan de manera similar con la radiación electromagnética y que no solo los elementos químicos pueden absorber y emitir energía en forma de luz. Además, experimentalmente es más sencillo obtener moléculas luminiscentes a partir de sustancias

de la vida cotidiana que hacerlo a través de elementos puros, ya que para esto se necesitan tubos de descarga o quemar sales que contengan algún metal (procesos que tienen mayor peligrosidad).^[4] Todo esto hace que este diseño experimental sea adecuado como proyecto dentro del programa Bachillerato de Excelencia.

El diagrama de Jablonsky,^[5] (Fig. 2) permite explicar los dos procesos luminiscentes que se pueden encontrar a nivel molecular: fluorescencia (proceso rápido) y fosforescencia (proceso lento). La fluorescencia es un proceso rápido puesto que la transición energética se produce entre dos estados singlete (transición permitida) mientras que la fosforescencia es un proceso lento ya que tiene lugar entre un estado triplete y uno singlete (transición prohibida). Por este motivo, la fluorescencia solo se observa mientras se está irradiando la muestra y la fosforescencia tiene lugar incluso después de haber sometido la muestra a una fuente de excitación.

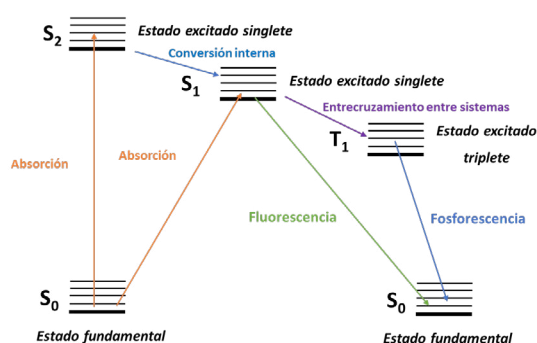
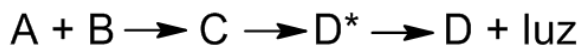


Figura 2. Diagrama de Jablonsky.

Por otro lado, existen algunas reacciones químicas que emiten energía en forma de luz, este fenómeno recibe el nombre de quimioluminiscencia.^[6] Como se ve en el esquema 1 los reactivos dan lugar a un intermedio de reacción o producto en estado excitado, que evoluciona liberando la energía en forma de fotones provocando el fenómeno de quimioluminiscencia.



Esquema 1. Ecuación química de un proceso quimioluminiscente.

Fluorescencia: uso y extracción de sustancias cotidianas.

A nuestro alrededor podemos encontrar fácilmente muchas sustancias que poseen moléculas fluorescentes como son la tónica (quinina), las espinacas (clorofila), la cúrcuma (curcumina), gotas oftálmicas (fluoresceína) y pastillas de vitamina C, las cuales contienen riboflavina como aditivo fluorescente (Fig. 3).^[7]

Es poco habitual que la fluorescencia se produzca por absorción de radiación UV con una longitud de onda inferior a 250 nm, ya que esta radiación tiene energía suficiente para desactivar el electrón del estado excitado, por este motivo para los experimentos se utilizó una linterna de luz UV con la longitud de onda de 395 nm.^[8] Debido a esto las transiciones $\sigma \rightarrow \sigma^*$ son poco habituales dentro del fenómeno de fluorescencia. En su lugar, son más comunes transiciones electrónicas menos

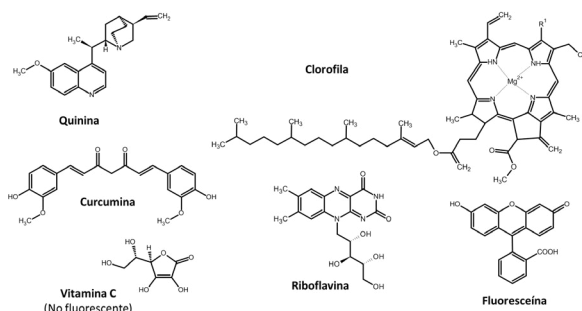


Figura 3. Estructuras químicas de las moléculas implicadas en los experimentos.

energéticas como son las $\pi^* \rightarrow \pi$ (compuestos con dobles enlaces conjugados), donde la eficiencia cuántica es muy grande o $\pi^* \rightarrow n$ (compuestos con heteroátomos con pares de electrones no enlazantes). Los fenómenos de fluorescencia de mayor intensidad se encuentran en compuestos aromáticos con transiciones $\pi^* \rightarrow \pi$ de baja energía.

Para los experimentos que se realizaron dentro de este proyecto, la tónica fue usada directamente, la clorofila y la curcumina fueron extraídas con etanol, y las gotas oftálmicas y las pastillas de vitamina C (con riboflavina) disueltas en agua preparando sendas disoluciones. En todos los casos se utilizó la linterna de luz ultravioleta para irradiar las muestras y observar el fenómeno de fluorescencia. Además, se estudió la adición de diferentes sustancias para estudiar su influencia en este fenómeno.

Estudio de la fluorescencia de la quinina presente en la tónica

La quinina es un alcaloide proveniente de la corteza de los árboles del género *Cinchona* que ha sido utilizado como anti-malárico. Su descubrimiento data del s. XVII durante una de las expediciones europeas desde Sudamérica, cuando los jesuitas se dieron cuenta de que los indios utilizaban la corteza de unos árboles para tratar esta enfermedad. Esta molécula presenta dos nitrógenos en su estructura, lo que permite que presente dos equilibrios ácido-base que dan lugar a la formación de un monocatión y un dicatión (Fig. 4).^[9]

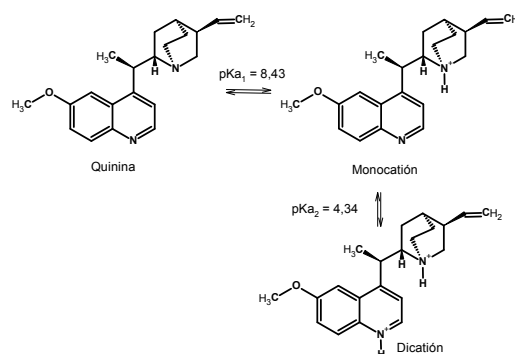


Figura 4. Equilibrios ácido-base de la quinina.

Como se observa en la Figura 5 la molécula de quinina exhibe fluorescencia azul ($\lambda = 450 \text{ nm}$) al ser expuesta a luz UV.



Figura 5. Muestras de tónica sin iluminar (izquierda) e iluminada con luz UV (derecha).

A continuación, se añadió 1 mL de diferentes sustancias (H_2O , NH_3 , H_2SO_4 , NaCl , HCl y NaOH) a cada una de las alícuotas de tónica y se volvió a irradiar con luz UV como se muestra en la Figura 6, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 1.

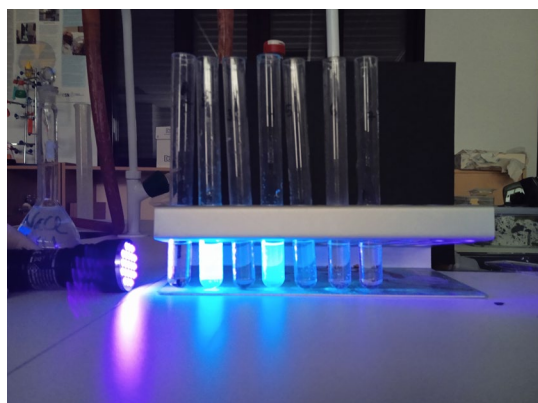


Figura 6. Muestras de tónica tras añadir distintas sustancias, de izquierda a derecha: blanco, H_2O , NH_3 , H_2SO_4 , NaCl , HCl y NaOH .

Tabla 1. Ensayo con muestras de tónica.

Ensayo	Sustancia añadida	Observaciones
1	H_2O (blanco, sin tónica)	No hay fluorescencia
2	H_2O	Fluorescencia
3	NH_3 (30%)	No hay fluorescencia
4	H_2SO_4 (0,2 M)	Fluorescencia
5	NaCl (0,1 M)	No hay fluorescencia
6	HCl (37%)	No hay fluorescencia
7	NaOH (0,1 M)	No hay fluorescencia

En todos los casos la fluorescencia desaparece salvo cuando se añadió ácido sulfúrico. Cabe destacar que la fluorescencia fue recuperada en la muestra tratada con NaOH tras la adición de H_2SO_4 . Los resultados revelan que el fenómeno de fluorescencia se observa en las especies protonadas (monocación y dicación), lo que significa que el nitrógeno de la quinuclidina no afecta a las propiedades electrónicas de la molécula. Sin embargo, la fluorescencia disminuye en medio básico (molécula neutra) como consecuencia de los enlaces de hidrógeno que se forman con el disolvente (agua).^[9] Por otro lado, se observa que el ion cloruro (ensayo 5) provoca la extinción dinámica de la fluorescencia al colisionar con la molécula en el estado excitado, haciendo que esta pierda la energía de manera no radiativa.^[10]

Estudio de la fluorescencia de la clorofila presente en las hojas de espinacas

La clorofila es una macromolécula de porfirina (también presente en la hemoglobina) que se encuentra coordinada a un ion Mg^{2+} (Fig. 3). Además, esta molécula es uno de los pigmentos implicados en la fotosíntesis de las plantas. Durante este proceso la molécula absorbe un fotón pasando al correspondiente estado excitado. Cuando la molécula regresa al estado fundamental cede energía, la cuál es empleada para crear un gradiente de protones a través de la membrana de los cloroplastos para generar ATP (fuente de energía).

El extracto de espinacas contiene varios componentes (se puede observar en cromatografía en capa fina) como son clorofila A y B, xantofilas y carotenos. Como se observa en la Figura 7, al irradiar el extracto de espinacas con luz UV se detecta fluorescencia de color rosa ($\lambda = 620\text{-}680\text{ nm}$), lo que corresponde con el espectro de emisión de las clorofilas.

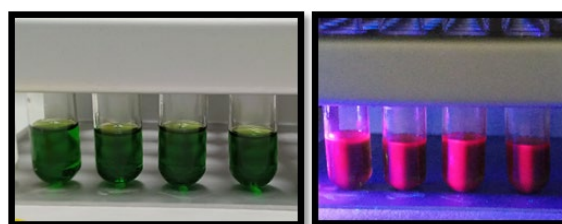


Figura 7. Muestras de extracto de espinacas sin iluminar (izquierda) e iluminada con luz UV (derecha).

A continuación, se añadió 1 mL de diferentes sustancias a diferentes muestras de extracto de espinacas y se volvió a irradiar con luz UV como se muestra en la Figura 8, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 2.

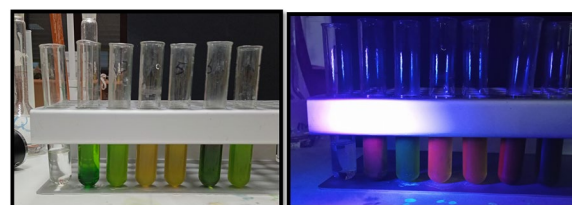


Figura 8. Muestras de extracto de espinacas tras añadir distintas sustancias, de izquierda a derecha: blanco, H_2O , NH_3 , H_2SO_4 , NaCl , HCl y NaOH .

Tabla 2. Ensayos con extracto de espinacas.

Ensayo	Sustancia añadida	Observaciones
1	H_2O (blanco, sin extracto de espinacas)	No hay fluorescencia
2	H_2O	Color verde, fluorescencia
3	NH_3 (30%)	Color verde pardo, no hay fluorescencia
4	H_2SO_4 (0,2 M)	Color amarillo, fluorescencia
5	NaCl (0,1 M)	Color amarillo, fluorescencia
6	HCl (37%)	Color verde intenso, fluorescencia
7	NaOH (0,1 M)	Color verde pardo, turbidez, no hay fluorescencia

Se observó que las muestras que contenían medio básico (ensayos 3 y 7) perdieron el color verde intenso dejando de exhibir fluorescencia, esto es debido a que los dos ésteres presentes en la molécula de clorofila se saponifican dando lugar a clorofilida, fitol y metanol.^[11] Al añadir H_2SO_4 , la muestra se volvió a amarilla sin perder la capacidad de emitir luz, esto sugiere que se ha producido la feofitización de la clorofila (el ion Mg^{2+} ha sido sustituido por dos hidrógenos), lo cual es habitual a pH ácidos. El pH ácido también promueve la formación de enlaces de hidrógeno y la deformación del anillo de clorofila dando lugar a agregados tipo H y tipo J, lo que provoca una disminución de la fluorescencia como se observa en el ensayo 6 (HCl).^[12] El comportamiento observado para la muestra que contenía NaCl fue similar al ensayo 4.

Estudio de la fluorescencia de la curcumina presente en la cúrcuma

La cúrcuma es una especia que se encuentra en los rizomas de la planta que lleva el mismo nombre (perteneciente a la familia del jengibre). Además, está especia forma parte del curry, un condimento habitual en la cocina tailandesa e india. La cúrcuma contiene un compuesto llamado curcumina (Fig. 3) que exhibe fluorescencia verde (Fig. 9) teniendo su máximo de emisión a 590 nm de longitud de onda, y además presenta una amplia variedad de propiedades farmacológicas. Esta fluorescencia es debida a que la curcumina existe en su forma enólica, debido a que es una β -dicetona, ya que en esta estructura resonante los dos cromóforos se comunican a través de un sistema conjugado de electrones π .^[13]

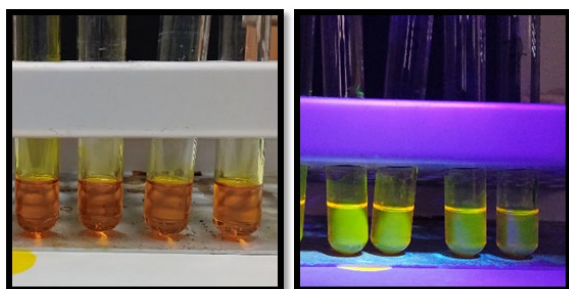


Figura 9. Muestras de extracto de cúrcuma sin iluminar (izquierda) e iluminada con luz UV (derecha).

Esta sustancia además de presentar propiedades antitumorales también puede comportarse como indicador ácido-base.^[14,15] gracias a los cambios estructurales que se producen al variar el pH como se observa en la figura 10.

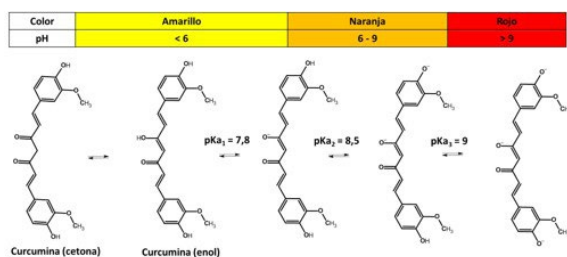


Figura 10. Equilibrios ácido-base de la curcumina y aplicación como indicador.

A continuación, se añadió 1 mL de diferentes sustancias a las muestras extracto de cúrcuma y se volvió a irradiar con luz UV como se muestra en la Figura 11, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 3.

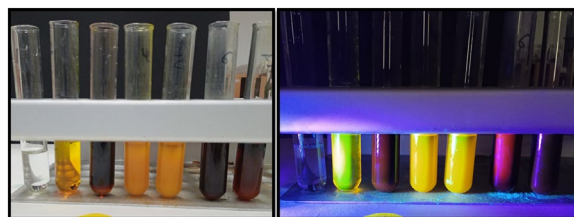


Figura 11. Muestras de extracto de curcumina tras añadir distintas sustancias, de izquierda a derecha: blanco, H_2O , NH_3 , H_2SO_4 , NaCl, HCl y NaOH.

Tabla 3. Ensayos con extracto de cúrcuma.

Ensayo	Sustancia añadida	Observaciones
1	H_2O (blanco, sin extracto de cúrcuma)	No hay fluorescencia
2	H_2O	Fluorescencia
3	NH_3 (30%)	Cambio de color a rojo, no hay fluorescencia
4	H_2SO_4 (0,2 M)	No hay fluorescencia
5	NaCl (0,1 M)	No hay fluorescencia
6	HCl (37%)	Cambio de color a marrón, no hay fluorescencia
7	NaOH (0,1 M)	Cambio de color a rojo, no hay fluorescencia.

Se observó que en todos los casos la fluorescencia se extinguió, lo que significa que el pH tiene una influencia muy importante en este fenómeno. Según la literatura, la fluorescencia de la curcumina decrece por debajo de $\text{pH} = 1$ y por encima de $\text{pH} = 8,3$.^[13] Además, se sabe que el compuesto se degrada a pH extremos dando lugar a ácido ferúlico, feruloilmetano, vainillina y acetona.^[14] Las muestras que contienen medio básico (ensayos 3 y 7) pasaron a poseer color rojo debido a la formación del enolato del compuesto, mientras que la muestra que contenía H_2SO_4 (ensayos 4) se volvió amarilla por la predominancia de la especie dicetona. El hecho de que se pierda la fluorescencia a pH extremo está relacionado con cambios en las propiedades electrónicas de la molécula de curcumina, provocando la ausencia de fluorescencia. En el experimento que se añadió HCl concentrado (ensayo 6) se observó que la muestra cambió exhibiendo un color marrón, lo que corresponde a la degradación de la curcumina. Por último, la presencia de NaCl (ensayo 5) provocó de nuevo la extinción dinámica de la fluorescencia debido al ion cloruro.

Fluorescencia de la riboflavina presente en la vitamina C

La vitamina C (Fig. 3), también conocida como ácido ascórbico, se encuentra presente en cítricos y verduras. Además, se puede obtener fácilmente en el supermercado como complemento alimenticio. Esta vitamina es esencial para el crecimiento y desarrollo normal de cuerpo humano, su carencia puede provocar enfermedades graves como el escorbuto, dolencia habitual que hacía enfermar a los marineros entre los siglos XVI y XVIII. Sin embargo, la vitamina C no presenta fluorescencia

debido a que no posee un sistema conjugado de electrones π . La riboflavina o vitamina B2 (Fig. 3), es una vitamina hidrosoluble que es importante para el crecimiento, la producción de glóbulos rojos y para la liberación energía de los carbohidratos, las proteínas y las grasas. Esta molécula se encuentra como aditivo en las pastillas de vitamina C comerciales, por lo que es fácilmente accesible.

La vitamina B2 exhibe fluorescencia amarilla-verdosa ($\lambda = 525$ nm) cuando es irradiada bajo luz UV (Fig. 12).

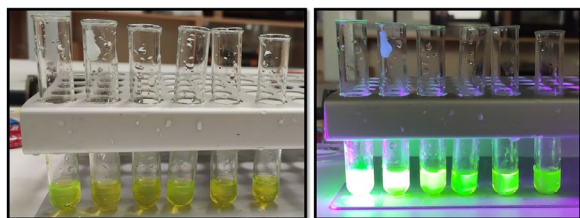


Figura 12. Muestras de vitamina B2 sin iluminar (izquierda) e iluminada con luz UV (derecha).

Esta sustancia presenta dos equilibrios ácido-base que se encuentran representados en la figura 13.

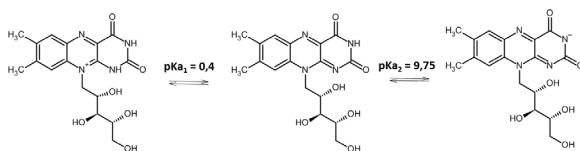


Figura 13. Equilibrios ácido-base de la riboflavina (vitamina B2).

A continuación, se añadió 1 mL de diferentes sustancias a las muestras de vitamina B y se volvió a irradiar con luz UV como se muestra en la Figura 14, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 4.

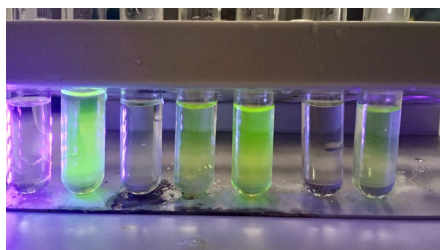


Figura 14. Muestras de extracto de vitamina C tras añadir distintas sustancias de izquierda a derecha: blanco, H_2O , NH_3 , H_2SO_4 , NaCl, HCl y NaOH.

Tabla 4. Ensayos con vitamina C.

Ensayo	Sustancia añadida	Observaciones
1	H_2O (blanco, sin vitamina C)	No hay fluorescencia
2	H_2O	Fluorescencia
3	NH_3 (30%)	No hay fluorescencia
4	H_2SO_4 (0,2 M)	Fluorescencia atenuada
5	NaCl (0,1 M)	Fluorescencia atenuada
6	HCl (37%)	No hay fluorescencia
7	NaOH (0,1 M)	No hay fluorescencia

Se observó que las muestras que contienen medio básico (ensayos 3 y 7) perdieron la fluorescencia y que las que contenían medio ácido (ensayos 4 y 6) perdían o atenuaban su capacidad de emitir luz. Según la literatura, el catión de la riboflavina no es fluorescente y el anión correspondiente presenta un rendimiento cuántico muy bajo.^[17] Esto significa que tanto la especie catiónica como la especie aniónica modifican su estructura electrónica de tal manera que no son capaces de exhibir fluorescencia. Por último, la presencia de iones cloruro vuelve provocar la desactivación no radiativa del estado excitado de la riboflavina, algo que ya ha sido observado en los experimentos con la quinina y la curcumina.

Fluorescencia de la fluoresceína

La fluoresceína (Fig. 3) es una molécula orgánica que se utiliza en oftalmología para la detección de cuerpos extraños en el ojo y daños en la córnea. Este compuesto exhibe fluorescencia verde ($\lambda = 485$ nm) como se observa en la figura 15.

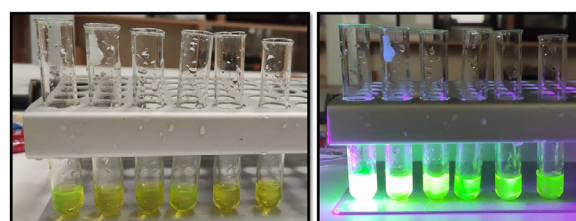


Figura 15. Muestras de fluoresceína sin iluminar (izquierda) e iluminada con luz UV (derecha).

La fluoresceína posee un ácido carboxílico y un fenol en su estructura, por lo que presenta diferentes equilibrios ácido-base como se puede ver en la figura 16.

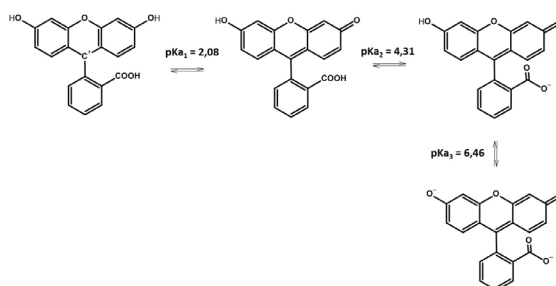


Figura 16. Equilibrios ácido-base de la fluoresceína.

A continuación, se añadió 1 mL de diferentes sustancias a las muestras de fluoresceína y se volvió a irradiar con luz UV como se muestra en la Figura 17, obteniendo los resultados reflejados en la Tabla 5.

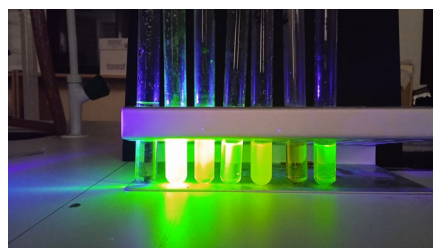


Figura 17. Muestras de extracto de fluoresceína tras añadir distintas sustancias, de izquierda a derecha: blanco, H_2O , NH_3 , H_2SO_4 , NaCl, HCl y NaOH.

Tabla 5. Ensayos con fluoresceína.

Ensayo	Sustancia añadida	Observaciones
1	H ₂ O (blanco, sin fluoresceína)	No hay fluorescencia
2	H ₂ O	Fluorescencia
3	NH ₃ (30%)	Fluorescencia
4	H ₂ SO ₄ (0,2 M)	Fluorescencia atenuada
5	NaCl (0,1 M)	Fluorescencia
6	HCl (37%)	No hay fluorescencia
7	NaOH (0,1 M)	Fluorescencia

Se pudo observar que la fluorescencia se mantiene a pH básico y que disminuye o desaparece a pH ácido. Esto es debido a que el dianión y anión son estructuras fluorescentes, siendo el dianión el derivado que presenta mayor rendimiento cuántico. Se sabe que la fluorescencia que exhiben el anión y la molécula neutra de la fluoresceína son muy similares, ya que el grupo carboxilo no influye en la estructura xanténica, que es la causante de la emisión de luz.^[18] Igualmente, es conocido que el catión de la fluoresceína no es fluorescente, por este motivo no se observa el fenómeno en ácido clorhídrico concentrado. Por último, la presencia de cloruros no inhibió la fluorescencia, esto es debido a que la fluoresceína presenta un rendimiento cuántico muy alto.

Diferencias entre fluorescencia y fosforescencia

Para observar las diferencias entre ambos fenómenos luminiscentes se empleó tónica comercial (quinina, compuesto fluorescente) y un objeto pintado con pintura fosforescente. Como se observa en la figura 18 la tónica solo exhibe luminiscencia cuando es irradiada, sin embargo, la pintura fosforescente emite fotones, aunque no se encuentre bajo la luz UV. Esto sucede porque la fosforescencia es un fenómeno lento debido a que es consecuencia de una transición electrónica prohibida.



Figura 18. Tónica y objeto con pintura fosforescente bajo luz UV (izquierda). Tónica y objeto con pintura fosforescente después de haber sido irradiados con luz UV (derecha).

Quimioluminiscencia: la química de las barras luminosas

El fenómeno de quimioluminiscencia se caracteriza por producir una emisión de fotones como consecuencia de una reacción química. Una forma fácil y accesible de observar este proceso con estudiantes de bachillerato es usar las barras luminiscentes utilizando algunos de los experimentos desarrollados por Kuntzman.^[19] Estas barras están formadas por un tubo de plástico que contiene difenil oxalato y un colorante fluorescente (responsable del color de la luz de cada barra luminiscente) además de tener integrado un compartimento de vidrio que contiene agua oxigenada. Cuando se rompe este tubo de vidrio ambos líquidos se ponen en contacto y tiene lugar la reacción química (Fig. 19).

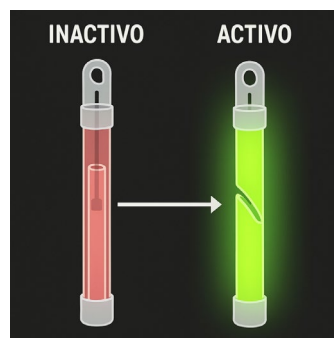
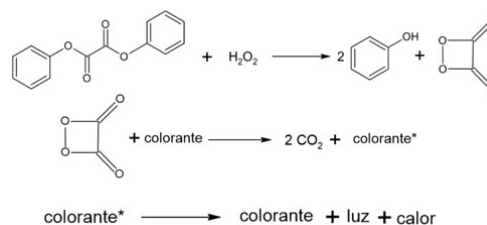


Figura 19. Funcionamiento de las barras luminiscentes. (Imagen realizada con inteligencia artificial).

Lo que sucede es que el compuesto difeniloxalato reacciona con agua oxigenada para dar lugar a un intermedio dioxetanodio, muy reactivo debido a que se encuentra muy constreñido. Este intermedio cíclico reacciona con el colorante fluorescente liberando CO₂ y transfiriéndole energía para que éste pase a su estado excitado. Por último, el colorante libera la energía acumulada en forma de luz y calor (Esquema 2).



Esquema 2. Mecanismo de la reacción quimioluminiscente.

Para estudiar en más detalle este proceso y comprender como funciona se han realizado cuatro experimentos diferentes.

Influencia de la temperatura

Las reacciones químicas se producen cuando las moléculas de reactivos chocan con la suficiente energía y la orientación adecuada produciéndose rupturas y formación de enlaces. Cuanto mayor sea la temperatura de la reacción mayor será la energía cinética de las partículas, produciendo un aumento de la velocidad de la reacción.

Para estudiar de manera cualitativa la cinética del proceso de quimioluminiscencia se introdujeron las barras luminiscentes activadas dentro de tres vasos de agua a diferentes temperaturas (Fig. 20).

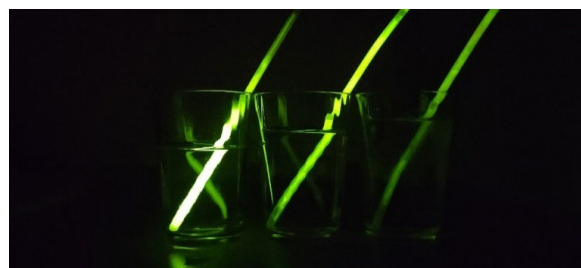


Figura 20. Barras luminiscentes a distintas temperaturas. De izquierda a derecha: agua caliente, agua a temperatura ambiente, agua fría.

Como se puede ver, la barrita a mayor temperatura emite mayor intensidad luminosa y la que se encuentra a menor temperatura emite menor intensidad. Esto es debido a que la intensidad luminosa depende del número de fotones emitidos,

lo que aumenta al aumentar la velocidad de la reacción con la temperatura.

Comprobación de la presencia de catálisis básica

La reacción que tiene lugar dentro de las barras luminiscentes es catalizada por medio básico, siendo el anión salicilato el derivado más usado habitualmente. Este ion es una base débil que se encuentra en equilibrio con el ácido salicílico (Fig. 21). Este equilibrio puede ser modificado por adición de ácido o base al medio.

Para estudiar este fenómeno se activaron varias barras lumi-

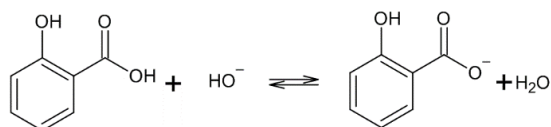


Figura 21. Equilibrio ácido-base del ácido salicílico y salicilato.

niscentes del mismo color añadiendo su contenido a tres tubos de ensayo distintos (Fig. 22). A continuación, se añadieron diferentes sustancias con la intención de comparar la luminiscencia con diferentes valores de pH. Los resultados se muestran en la tabla 6.

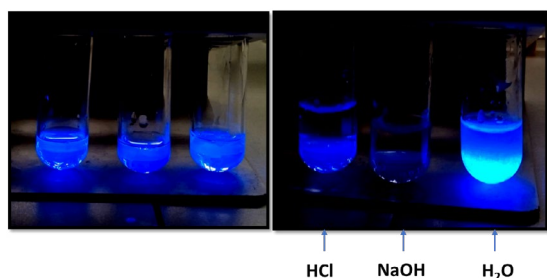


Figura 22. Contenido de barras luminiscentes activadas antes (izquierda) y después (derecha) de la adición de HCl, NaOH y H₂O.

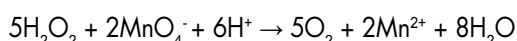
Tabla 6. Ensayos de quimioluminiscencia a diferentes pH.

Ensayo	Sustancia añadida	Observaciones
1	HCl (0,1 M)	Emisión de luz atenuada
2	NaOH (0,1 M)	Emisión de luz muy ávida e intensa
3	H ₂ O	No hay cambios

Se observa una atenuación de la luz emitida en la muestra que está en medio ácido, ya que la reacción se ralentiza. Por otro lado, la muestra a la que fue añadida medio básico emitió luz aumentando mucho su intensidad, pero apagándose a los pocos segundos. Las observaciones se justifican a través de la catálisis básica del proceso.

Detección de uno de los reactivos: agua oxigenada

Uno de los reactivos empleados en las barras luminiscentes es H₂O₂. El agua oxigenada puede ser detectada a través de la siguiente reacción química con KMnO₄.



Esquema 3. Reacción redox entre H₂O₂ y MnO₄⁻.

Para realizar este experimento se debe extraer el tubo de vidrio que se encuentra en el interior las barras luminosas. A continuación, se vierte la disolución transparente (contiene H₂O₂) sobre la disolución de KMnO₄ de color morado. Como se observa en la figura 23, la disolución morada pierde su color y se vuelve transparente, ya que el permanganato se reduce a Mn²⁺ (incoloro) produciendo O₂ y H₂O.

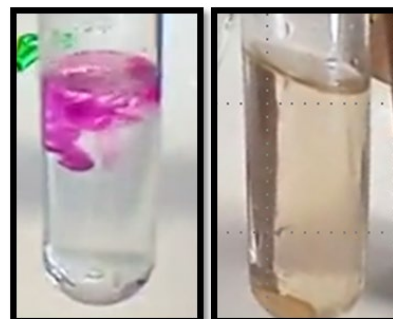


Figura 23. Disolución de H₂O₂ de una barra luminiscentes con MnO₄⁻ (izquierda) y Mn²⁺ (derecha).

Detección de uno de los productos: dióxido de carbono

Uno de los productos de la reacción de quimioluminiscencia es CO₂. Este compuesto forma parte de los extintores porque al ser un gas más denso que el oxígeno es capaz de desplazar a este favoreciendo que se apague la llama consecuencia de las reacciones de combustión.

Para detectar el dióxido de carbono se añadió la disolución de una barra luminiscente dentro de un tubo de ensayo y seguidamente se introdujo una cerilla encendida. Lo que se observa es que la llama se extingue inmediatamente lo que confirma la liberación de CO₂ durante el proceso fotoquímico (Fig. 24).



Figura 24. Cerilla antes (izquierda) y después de ser expuesta a CO₂.

Conclusiones

A través de sustancias accesibles a nuestro alrededor se ha desarrollado un proyecto muy atractivo dentro del programa de Bachillerato de Excelencia que permite al alumnado conocer el fenómeno de luminiscencia en mayor profundidad. Este proyecto proporciona herramientas para analizar la relación que existe entre la química y la luz, pudiéndose observar la estrecha relación que existen entre la fluorescencia y la estructura electrónica de molécula. Todas las moléculas fluorescentes que fueron estudiadas poseen un sistema de electrones π altamente conjugado y estructuras rígidas, lo que favorece la eficiencia cuántica, ya que las transiciones π* → π son las causantes de este fenómeno. De igual manera se pudo observar la diferencia

de manera cualitativa entre los fenómenos de fluorescencia y fosforescencia. Por último, se evaluaron los factores que influyen la reacción química luminiscente que se produce en las barras luminosas, detectando tanto reactivos como productos implicados. Este proyecto permite el acercamiento la ciencia a estudiantes de bachillerato permitiendo un acercamiento a la actividad investigadora, fomentando la curiosidad y el aprendizaje de la química.

Agradecimientos

Agradecer al Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y Química (GEDH) la concesión del segundo premio a la labor educativa: «Física y Química para el conocimiento de la ciencia y la tecnología cuántica». Agradecer el trabajo de la alumna Margarita Mapane Muadakuku de 2º Bachillerato de Excelencia del IES Francisco Umbral su implicación en este proyecto.

Bibliografía

- [1] P. Douglas, M. Garley, *Science in School* **2010**, 14, 63-68.
- [2] L. Peña, *Revista Digital Universitaria* **2018**, 19(3), <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2018.v19n3.a1>.
- [3] P. B. O'Hara, W. St. Peter, C. Engelson, *J. Chem. Educ.* **2005**, 82, 49-52, <https://doi.org/10.1021/ed082p49>.
- [4] S. Heredia Avalos, *Rev. Eureka Enseñ. Divul. Cien.* **2008**, 5(3), 377-381, https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2008.v5.i3.12.
- [5] H. H. Jaffe, A. L. Miller, *J. Chem. Educ.* **1966**, 43(9), 469-473, <https://doi.org/10.1021/ed043p469>.
- [6] E. Welsh, *Science in School* **2011**, 19, 62-68.
- [7] M. Hamer, A. M. Beraldi, S. G. J. Gómez, F. Ortega, D. Onna, M. Hamer, *J. Chem. Educ.* **2021**, 98(8), 2625-2631, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00328>.
- [8] D. Wong, "Fluorescence and Phosphorescence", disponible en [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Fluorescence_and_Phosphorescence](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Fluorescence_and_Phosphorescence), consultado (04/03/2026).
- [9] S. G. Schulman, R. M. Threatte, A. C. Capomacchia, W. L. Paul, *J. Pharm. Sci.* **1974**, 63, 6, 876-880, <https://doi.org/10.1002/jps.2600630615>.
- [10] J. R. Lakowicz en *Principles of fluorescence spectroscopy*, (Eds.: J. R. Lakowicz), Springer, Boston, **2006**, 333-351, https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4_9.
- [11] S. Badui Dergal, *Química de los alimentos*, Pearson, México, **2006**.
- [12] F. Qu, N. Gong, S. Wang, Y. Gao, C. Sun, W. Fang, Z. Men, *Dyes Pigm.* **2020**, 173, 107975, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.107975>.
- [13] P.-H. Bong, *Bull. Korean Chem. Soc.* **2000**, 21(1), 81-86, <https://doi.org/10.5012/bkcs.2000.21.1.81>.
- [14] R. Kuttan, P. Bhanumathy, K. Nirmala, M. C. George, *Cancer Lett.* **1985**, 29(2) 197-202, [https://doi.org/10.1016/0304-3835\(85\)90159-4](https://doi.org/10.1016/0304-3835(85)90159-4).
- [15] R. M. Caraballo, L. M. S. Medina, S. G. J. Gomez, P. Vensaus, M. Hamer, *J. Chem. Educ.* **2021**, 98(3), 958-965, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01165>.
- [16] H. H. Tonnesen, en *Phenolic Compounds in Food and Their Effects on Health I ACS Symposium Series, Vol. 506* (Eds.: C.-T. Ho, C. Y. Lee, M.-T. Huang, ACS Publications, Washington, **1992**, pp. 143-153, <https://doi.org/10.1021/bk-1992-0506.ch011>.
- [17] P. Drössler, W. Holzer, A. Penzkofer, P. Hegemann, *Chem. Phys.* **2002**, 282(3), 429-439, [https://doi.org/10.1016/S0301-0104\(02\)00731-0](https://doi.org/10.1016/S0301-0104(02)00731-0).
- [18] H. Diehl, R. Markuszewskis, *Talanta* **1989**, 36(3), 416-418, [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(89\)80213-9](https://doi.org/10.1016/0039-9140(89)80213-9).
- [19] T. S. Kuntzleman, K. Rohrer, E. Schultz, *J. Chem. Educ.* **2012**, 89(7), 910-916, <https://doi.org/10.1021/ed200328d>.



Ana M. del Hoyo Martín

Departamento de Física y Química, IES Francisco Umbral, Ciempozuelos, Madrid
Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química (RSEF y RSEQ)

C-e: anamaria.delhoyomartin@educa.madrid.org
ORCID: 0000-0002-4173-1526

Doctora en Química Orgánica (2014) por la Universidad Autónoma de Madrid. Ha trabajado en investigación en la Universidad de Groningen, ICIQ y NovAlix. Actualmente es profesora de Física y Química en IES Francisco Umbral de Ciempozuelos y miembro del Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química (RSEQ/RSEF). Ha participado en diferentes eventos de divulgación científica como: Disfrutar Divulgando Desinteresadamente y en la Feria Madrid es Ciencia dentro del stand de la RSEF.