



Los puntos cuánticos y el Premio Nobel de Química 2023

Quantum dots and the Nobel Prize in chemistry 2023

Eduardo Muñoz Cartagena¹

Resumen

El premio Nobel 2023 en el área de química, fue concedido a 3 investigadores: Alexei Ekimov, Luis Brus y Mounqi Bawendi, por sus aportes al descubrimiento, caracterización y control de la producción de los puntos cuánticos. Los puntos cuánticos son nanoestructuras semiconductoras que exhiben propiedades cuánticas, i. e., propiedades dependientes del tamaño. De acuerdo a estos aportes al conocimiento, es que desde mediados de los años 90 estas nanopartículas tienen diversas aplicaciones tecnológicas, tales como en la industria de la electrónica y la óptica, así como en la medicina, producción de sustancias, sensores, conversión de energía, entre otras. Este manuscrito busca dar una mirada general a las propiedades químicas y físicas de los puntos cuánticos, a los aportes de los investigadores galardonados en este campo, y a una experiencia propia en la utilización de estas partículas con fines de sensor de sustancias reactivas.

Palabras clave

Puntos cuánticos, nanopartículas, nanotecnología, premio Nobel química 2023.

Abstract

The 2023 Nobel Prize in chemistry was awarded to 3 researchers, Alexei Ekimov, Luis Brus, and Mounqi Bawendi, for their contributions to the discovery, characterization, and control of the production of quantum dots. Quantum dots are semiconductor nanostructures that exhibit quantum properties, i.e., size-dependent properties. According to these contributions to knowledge, since the mid-90s, these nanoparticles have had various technological applications, such as in the electronics and optics industry, as well as in medicine, production of substances, sensors, and energy conversion. , among others. This manuscript seeks to give a general look at quantum dots' chemical and physical properties, the contributions of award-winning researchers in this field, and our own experience in using these particles for sensor purposes of reactive substances.

Keywords

Quantum dots, nanoparticles, nanotechnology, Nobel Prize chemistry 2023.

¹ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Instituto de Química, Facultad de Ciencias, Valparaíso, Chile. eduardo.munoz.c@pucv.cl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9844-961X>

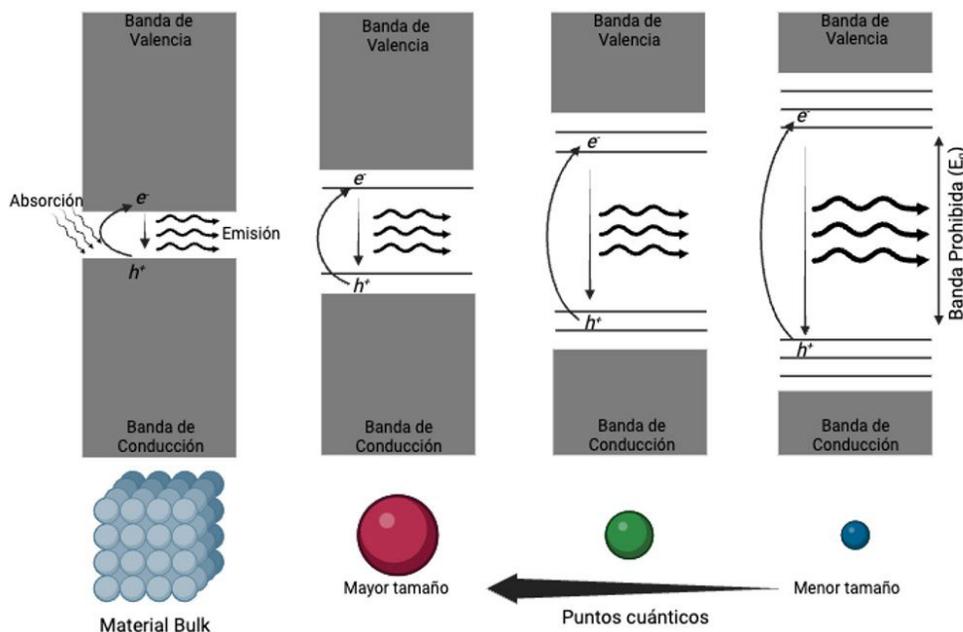
Introducción

Desde principios de la década de 1980, se han logrado notables avances en la tecnología, que ha permitido la producción de estructuras de tamaños nanométricos tales como nanotubos de carbono, nanorods, nanopartículas de oro y nanopartículas magnéticas (Charles P. Poole J, 2003; R. Dingle, 1974). La nanotecnología se define como el control y entendimiento de la materia a escalas comprendidas entre 1 y 100 nanómetros. A esta escala, los materiales experimentan fenómenos que propician cambios en sus propiedades físicas, químicas, eléctricas y ópticas, lo que permite dar nuevas aplicaciones a los materiales convencionales, siendo un ejemplo de ello los Quantum Dots o Puntos Cuánticos (R. Dingle, 1974; Ekimov, 1981).

Los puntos cuánticos son cristales coloidales semiconductores, constituidos por cientos o miles de átomos ordenados en una estructura cristalina de forma habitualmente esférica y de dimensiones entre nanómetros y algunas micras. Su característica esencial es que los electrones están obligados a mantenerse confinados entre las tres dimensiones, lo que genera diversos fenómenos cuánticos (confinamiento cuántico). Para que dicho proceso tenga lugar, el tamaño de los puntos cuánticos ha de ser similar al radio del excitón de Bohr (10 nm para los semiconductores en general; Ekimov, 1981). En términos de su interacción con la luz, los puntos cuánticos tienen un amplio espectro de absorción continua, desde longitudes de onda que comprenden el ultravioleta al visible, todo lo cual depende del tamaño de estas partículas. Sus amplios espectros de excitación y emisión, su bajo photobleaching y alta estabilidad fotoquímica, son algunas de sus propiedades (Pombo Barros, 2011). Debido a esto, se han investigado diversas aplicaciones, donde destacan la construcción de Celdas Solares (Chittreeya Tansakul, 2010; D. J. Norris, 1993), construcción de Láseres (Maureen A. Walling, 2009), Diodos Emisores de Luz (K. Tanabe, 2011; R. Debnath, 2010), Dispositivos Electrónicos (P. Kamat, 2010), biosensores en el campo de la medicina (Pombo Barros, 2011; Xinkun Li, 2011), quimiosensores para monitoreo dinámico de cambios internos de pH y niveles de glucosa en tumores cancerígenos (Lemon CM, 2014), así como también su uso como "vehículo" de transporte, anclaje y retención localizada de fármacos para el tratamiento de enfermedades (Bajpayee AG, 2014). Por su parte, en ingeniería informática y comunicaciones, ha permitido el desarrollo y la implementación de nuevos dispositivos electrónicos de menor tamaño y mayor capacidad de almacenamiento (Hilmi Volkan Demir, 2011; Amin Salehi-Khojin, 2012).

Al ser partículas semiconductoras, los puntos cuánticos poseen una banda prohibida (bandgap, E_g) que es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. La banda prohibida corresponde a la energía mínima que se debe proporcionar para promover un electrón (e^-) desde la banda de valencia (B_v) a la banda de conducción (B_c), creando un hueco en la banda de valencia (h^+). La disminución del tamaño de partícula, genera un mayor confinamiento cuántico del par electrón-hueco, generando un aumento de la banda prohibida que produce una absorción/emisión de luz hacia menores longitudes de onda conforma se disminuye el tamaño (Figura 1; Chaniotakis, 2009). Esta propiedad óptica de absorción/emisión que presentan estas nanopartículas, se conoce como emisión de fluorescencia, la cual puede ser modificada controlando su tamaño, i. e. variación del ancho de banda prohibida (E_g). Debido a esto, cuanto menor sea el tamaño de los QD, mayor será la energía requerida para producir la excitación de los electrones y con esto se produce un cambio en la longitud de onda de la emisión fluorescente.

FIGURA 1. Representación esquemática del fenómeno de confinamiento en los puntos cuánticos. Conforme disminuye el tamaño de la partícula, el ancho de la banda prohibida aumenta, y con esto la emisión de luz de fluorescencia es de menor longitud de onda (de mayor energía, i. e., se desplaza desde el rojo al azul).



La síntesis de los puntos cuánticos se puede realizar por dos vías; orgánica y acuosa. La primera, también denominada síntesis coloidal, emplea disoluciones de selenuro, telururo o sulfuro de cadmio, y se piroliza en un solvente de coordinación, e. g., tri-n-octil fosfina (TOP) u óxido de tri-n-octil fosfina (TOPO), a altas temperaturas, lo que permite la obtención de puntos cuánticos de muy buena calidad, formados por CdTe, CdSe, CdS y derivados. La ruta en fase acuosa, considera la reacción simultánea de sales metálicas solubles, e. g., Na_2TeO_3 , Na_2SeO_3 , con sales de cadmio, e. g., CdCl_2 , y compuestos tiónicos, llamados agentes de capping o cobertores, e. g., mercaptoetanol, ácido mercaptosuccínico, tioglicerol, los cuales estabilizan el nanocrystal formado. Por este procedimiento se pueden obtener nanocristales de CdSe y CdTe. Esta última ruta resulta más barata y sencilla, y permite obtener cristales de baja toxicidad, solubles en agua y estables (Pombo Barros, 2011).

Los científicos que permitieron el descubrimiento y el avance en el campo de los puntos cuánticos

A fines de la década de los 70 (1979), el físico ruso Alexei I. Akimov junto al físico teórico Alexander Efros, quienes trabajaban en el Instituto Óptico Estatal Vavilov, en la Unión Soviética, comenzaron a estudiar y a desarrollar teorías para explicar el color de vidrios modificados con materiales semiconductores, conocidos como vidrios Schott.



Alexei I. Ekimov: Físico ruso (nació en 1945, USSR), de Nanocrystals Technology Inc., fue el primero en descubrir los nanocristales semiconductores (conocidos como puntos cuánticos), en los años 80.

La técnica de crecimiento de partículas coloidales tuvo sus orígenes en la Edad Media, cuando se desarrolló para fabricar vitrales utilizados en las iglesias medievales. La amplia gama de colores presentes en estos vitrales, se atribuye a la presencia de pequeñas partículas de diversas sustancias, e. g.,

metales, óxidos metálicos y también materiales semiconductores. A. Ekimov analizó la estructura y composición química de estas partículas coloidales y estudió el mecanismo de su crecimiento. Para ello, investigó la influencia de la modificación de un vidrio con un compuesto en particular. Aunque los primeros intentos de experimentación resultaron en gran medida infructuosos, tuvo progresos al estudiar el vidrio modificado con cloruro de cobre. Los experimentos contemplaron someter estos vidrios a un intervalo de temperaturas comprendido entre 500 °C y 700 °C, variando el tiempo de calentamiento desde 1 hora hasta 96 horas. Una vez que el vidrio se enfrió y solidificó, un análisis mediante difracción de rayos-X (XRD), reveló la presencia de diminutos cristales de cloruro de cobre dentro del material vítreo. Los investigadores observaron que la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico tenían influencia sobre el tamaño promedio de los cristales formados, i. e., se producían cristales con tamaños del orden de los 2 a los 30 nm. Adicionalmente, Ekimov y Efros notaron que el tamaño de las partículas formadas afectaba la absorción de la luz en el vidrio, lo cual fue un hallazgo muy importante. Las partículas más grandes absorbían la luz de manera similar al cloruro de cobre en su forma bulk, i. e., material sin nanoestructuras, mientras que las partículas más pequeñas absorbían preferentemente la luz azul.

Dada su formación como físico, Ekimov comprendió que se trataba de un efecto cuántico, producido por el tamaño de las partículas. Este fue un hallazgo sorprendente, ya que se logró por primera vez la producción intencionada de puntos cuánticos, i. e., nanopartículas que generan efectos cuánticos dependientes del tamaño. Ekimov publicó estos descubrimientos en 1981 en una revista científica soviética (Ekimov, 1981). Sin embargo, una limitación de este innovador hallazgo, fue que los puntos cuánticos obtenidos se encontraban "inmovilizados" en el vidrio, lo que impedía utilizarlos de otra manera que no fuera el estudio de sus efectos ópticos.

Aproximadamente en la misma época, separados por miles de kilómetros, Louis E. Brus perteneciente a los Laboratorios Bell de Nueva Jersey, Estados Unidos, exploraba reacciones fotoquímicas en superficies de partículas de sulfuro de cadmio (CdS), mediante espectroscopía Raman. Su objetivo era inducir estas reacciones químicas mediante el empleo de energía solar, donde la absorción y emisión de luz por parte de las partículas de CdS, permitiera impulsar dichas reacciones.

Louis E. Brus: Químico estadounidense (nació en 1943, EE. UU.), de la Universidad de Columbia. Logró probar que los efectos cuánticos de los nanocristales semiconductores coloidales, suspendidos en líquidos, dependían de su tamaño.



ILUSTRACIÓN . Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach.

Durante su investigación, Brus observó casualmente efectos cuánticos asociados al tamaño, luego de evidenciar cambios en las propiedades ópticas de partículas de CdS que se dejaron en la mesa del laboratorio durante un día. Evidenció que cuando obtenía partículas muy pequeñas, la banda prohibida (band gap, E_g) era más grande, y si este coloide se dejaba reposar, crecían las partículas a mayores tamaños, y la banda prohibida se volvía similar a la de partículas más grandes. Posteriormente, se enfocó principalmente a estas nanopartículas, expandiendo sus estudios a sulfuro de zinc (ZnS), seleniuro de zinc (ZnSe), seleniuro de cadmio (CdSe) y haluros de plata (AgCl, AgBr). Aunque la física del estado sólido no era su campo principal, Brus se dio cuenta de la importancia de esta transición, i. e., entre un comportamiento asociado a "moléculas" para

las partículas muy pequeñas hacia un comportamiento del “estado sólido” de las partículas de mayor tamaño. Brus publicó este hallazgo en 1983 (Brus, 1983), pero no fue hasta el año siguiente que se enteró de los esfuerzos de A. Ekimov al leer traducciones de sus artículos. No fue hasta la década de 1990, que A. Ekimov y Efros obtuvieron visas para visitar a Brus en los Laboratorios Bell, permitiendo estos se reunieran después de años de colaboración a distancia. Los estudios de L. Brus y A. Ekimov acerca de los efectos cuánticos por tamaño de nanocristales coloidales resultaron extraordinariamente significativos, no obstante, aún existían desafíos. Los métodos hasta entonces empleados para la obtención de estas nanopartículas, generaban productos con calidad y tamaño impredecibles, por lo que se requería de un procedimiento de síntesis de estos cristales que fuese confiable, consistente y reproducible. El equipo conformado llevó a cabo numerosos experimentos, los cuales consistían en la variación de disolventes, temperaturas y técnicas.



Mounji Bawendi: Químico francés (nació en 1961, Francia), perteneciente al Massachusetts Institute of Technology (MIT). Revolucionó la producción química de puntos cuánticos, creando partículas de tamaño controlado.

Por su parte M. Bawendi, con experiencia en física teórica, realizó una pasantía de investigación en los laboratorios de Bell junto a Brus en el verano de 1987, como parte de una beca de posdoctorado. En ese momento, Bawendi no tenía experiencia en química inorgánica, sin embargo, todo eso cambió cuando ingresó a los laboratorios Bell. En sus primeros estudios, Bawendi pudo apreciar que un tratamiento de estas partículas con óxido de trioctilfosfina, permitía la obtención de partículas de un tamaño muy definido y sin defectos. El problema cambió a que sólo se podía obtener partículas de un solo tamaño. Una vez que Bawendi dejó los Laboratorios Bell en 1990, ocupó un puesto en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), y llevó este proyecto a esa institución, i. e., desarrollar métodos sintéticos para crear y caracterizar sistemas semiconductores de puntos cuánticos.

Luego de variadas investigaciones en este ámbito, se logró un gran avance empleando la síntesis por inyección en caliente. Esto considera una inyección rápida de los precursores de la reacción, que se encuentran a temperatura ambiente, en un disolvente que se encuentra a alta temperatura. Esto genera un proceso de nucleación, i. e., formación de pequeñas partículas coloidales, que se va deteniendo conforme baja la temperatura. Observaron entonces que una disminución abrupta de la temperatura, provocaba una detención del proceso de crecimiento, mientras que un incremento de la temperatura hasta un valor deseado, permitió un crecimiento controlado. El resultado fueron puntos cuánticos de seleniuro de cadmio (CdSe) con una estructura y forma regular y de un tamaño definido. En efecto, pudo obtenerse series de tamaños, que variaban una emisión de color desde el amarillo pálido para las partículas más pequeñas hasta un color rojo intenso para las partículas más grandes. En 1993, Bawendi y su equipo publicaron este trabajo en el *Journal of the American Chemical Society* (C. B. Murray, 1993). Este método era adaptable y reproducible, lo que significa que podría ser utilizado por otros investigadores que quisieran sintetizar nanopartículas de tamaño definido. En otras palabras, su trabajo finalmente abrió la puerta al desarrollo de aplicaciones a gran escala de puntos cuánticos.

ILUSTRACIÓN . Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach.

FIGURA 2. (Izq.) Esquema del proceso empleado por Bawendi, inyección de precursores a temperatura ambiental, en un solvente caliente. El tiempo de enfriamiento cambia los tamaños de las nanopartículas obtenidas. (Dcha.) emisión de luz de puntos cuánticos de distintos tamaños: desde violeta (partículas pequeñas) hasta el rojo (partículas grandes).

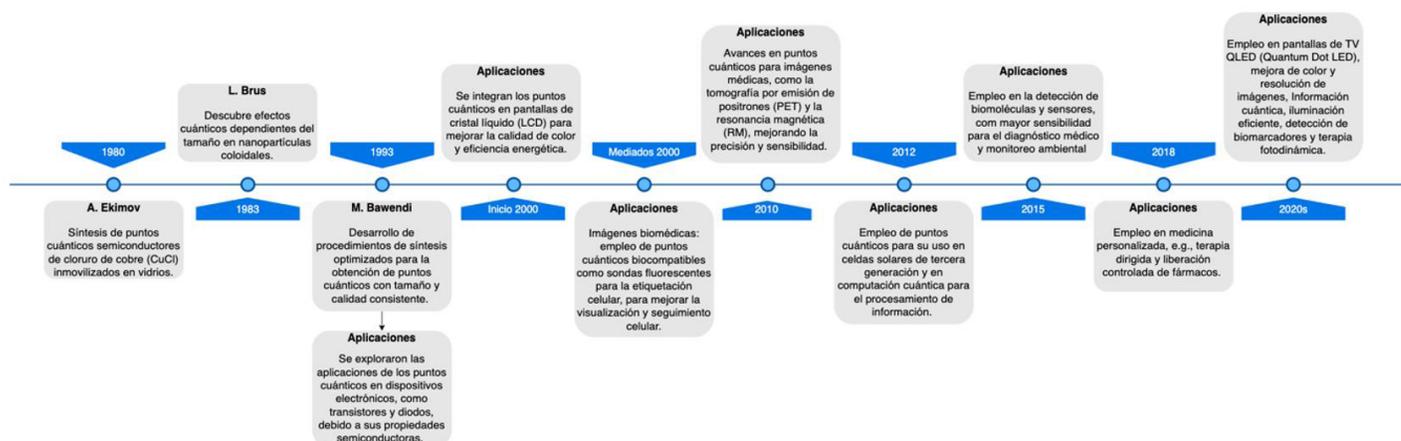
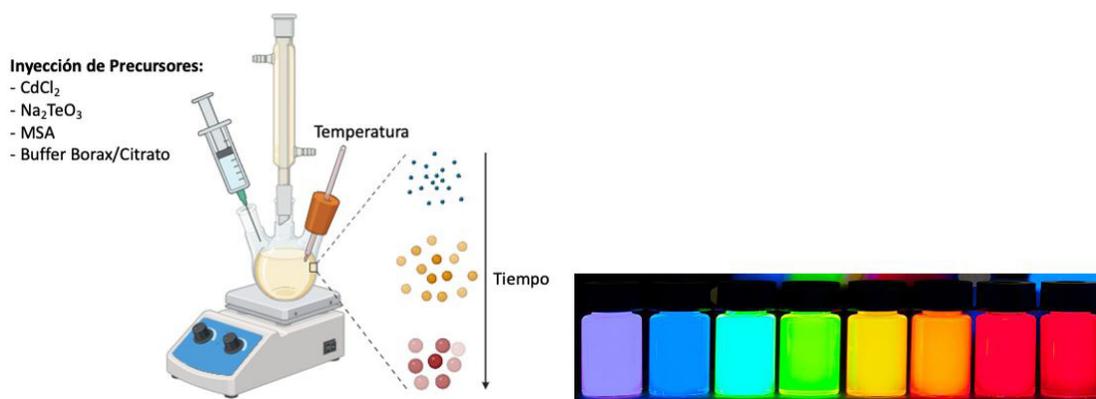


FIGURA 3. Línea de tiempo del descubrimiento y la evolución en algunas aplicaciones de los puntos cuánticos.

Una de nuestras experiencias con los puntos cuánticos

Nuestra investigación y aportes al campo de los puntos cuánticos, comenzó en el año 2012 y se prolongó hasta aproximadamente el año 2019. El objetivo de esta línea investigación, fue estudiar la interacción entre puntos cuánticos con radicales libres, con la finalidad de obtener respuestas que pudiesen ser empleadas como un sensor a radicales libres. Para ello, en una primera etapa se sintetizaron puntos cuánticos de telururo de cadmio (CdTe) de distintos tamaños, empleando la técnica propuesta por M. Bawendi, i.e., inyectar los precursores en un solvente en caliente, a distintas temperaturas en función del tiempo de la reacción. Es así que la temperatura, tiempo de reacción y pH son variables significativas en el proceso de síntesis de puntos cuánticos de CdTe. A través del control de estas variables y por medio de la optimización del proceso de síntesis mediante una estrategia quimiométrica, fue posible predecir el tamaño de los puntos cuánticos con un error que no supera el 5.00% (Emilio Navarrete S., 2019). En una segunda etapa, fueron empleados puntos cuánticos de distintos tamaños, i.e., 1.53 nm (QD1), 2.37 nm (QD2), 2.81 nm (QD3), 3.03 nm (QD4) y 3.11 nm (QD5).

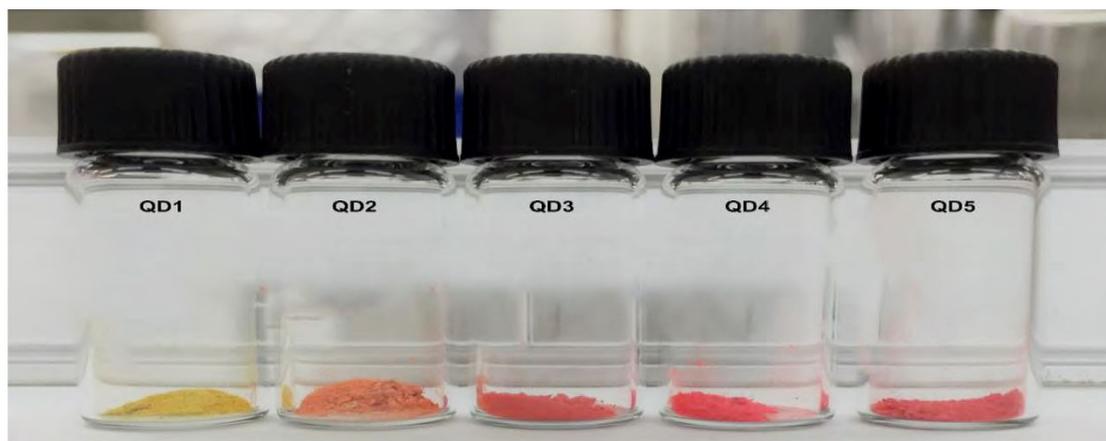
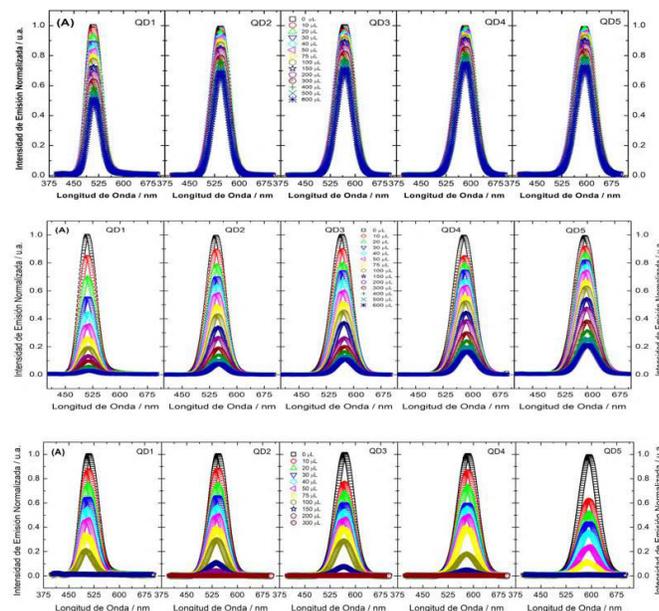
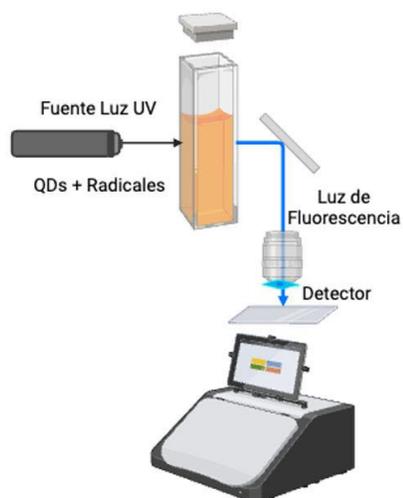


FIGURA 4. Sólidos de puntos cuánticos de CdTe de distintos tamaños, sintetizados y purificados para el estudio de la interacción con radicales libres.

Desde los sólidos obtenidos, y que se muestran en la Figura 4, fueron tomados 5.0 mg y dispersados en 50 mL de agua para producir suspensiones coloidales (como las obtenidas por M. Bawendi). Luego a estas disoluciones se le agregó distintos volúmenes de 3 radicales libres, e. g., un radical estable 2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl (TEMPO); un radical estable 4-Amino-2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl (4-amino-TEMPO) y un radical muy reactivo o inestable el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$). Para evaluar la interacción entre los puntos cuánticos y los distintos radicales libres, se analizó la respuesta óptica de fluorescencia que presentan las nanopartículas. Para ello, se iluminan los puntos cuánticos con una fuente ultravioleta, y se detecta la luz emitida por estos, en ausencia y en presencia de los radicales libres.

FIGURA 5. (Izq.) esquema de equipamiento de fluorescencia para el experimento de análisis de respuesta óptica de los puntos cuánticos. (Dcha. Superior) intensidad de luz de fluorescencia luego de la interacción de los distintos puntos cuánticos con radical TEMPO; (dcha. Central) intensidad de luz de fluorescencia luego de la interacción de los distintos puntos cuánticos con radical 4- Amino-TEMPO; (dcha. Inferior) intensidad de luz de fluorescencia luego de la interacción de los distintos puntos cuánticos con radical hidroxilo.



Desde los resultados obtenidos, se desprende que aquellos puntos cuánticos de menor tamaño (QD1), disminuyen más significativamente su intensidad de fluorescencia en función del aumento de la concentración de radicales, i. e., hay un incremento en la interacción punto cuántico-radical en la medida que la nanopartícula es de menor tamaño

(Eduardo Muñoz, 2019; Eduardo Muñoz R. M., 2021). Todos los efectos observados son dependientes tanto de la concentración de radical como también del tamaño de nanopartícula, permitiendo establecer relaciones de causalidad que podrían emplearse como bases para el diseño de un potencial sensor para este tipo de especies reactivas.

Conclusiones

Los puntos cuánticos han sido un área de investigación que se ha desarrollado los últimos 40 años, y que ha significado un esfuerzo de la química, la física cuántica y la nanotecnología. En estas áreas es en donde se han desarrollado los investigadores galardonados con el premio Nobel 2023, i. e., Alexei Akimov, Louis Brus y Mounqi Bawendi. Los puntos cuánticos son nanopartículas con propiedades semiconductoras, que exhiben un comportamiento cuántico que depende de su tamaño, e. g., pueden emitir luz de diferentes colores dependiendo de su tamaño, pueden modular la conductividad eléctrica, permiten la visualización de procesos biológicos a nivel celular con mayor precisión, y pueden servir como sensores a especies reactivas como los radicales libres. En conclusión, el descubrimiento y uso de los puntos cuánticos ha llevado a avances significativos en campos que van desde la electrónica hasta la medicina. Aunque enfrentan desafíos, como la toxicidad en ciertos contextos, las actuales investigaciones están abordando estos problemas y ampliando el espectro para sus aplicaciones prácticas.

Agradecimiento

El autor agradece el financiamiento proporcionado por FONDECYT, Chile (proyectos N.º 1210408 y 1150775) y por la VRIEA-PUCV (N.º 125.737/23 DII-PUCV). Adicionalmente, se agradece la invitación a participar con este artículo al profesor Cristian Merino de la PUCV.

Este artículo está dedicado al profesor Dr. David Carrillo en conmemoración de su cumpleaños número 85.

Referencias

- Charles P. Poole J, O. F. (2003). *Introduction to nanotechnology. United States of America. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties.* New York: The Royal Society & the Royal Academy of Engineering.
- Brus, L. E. (1983). A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites. *J. Chem. Phys.*, 79, 5566-5571.
- C. B. Murray, D. J. (1993). Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites. *Journal of the American Chemical Society*, 115, 8706-8715.
- Emilio Navarrete, S., J. R. (2019). Chemometric approach to study the influence of synthesis parameters on the size of CdTe quantum dots obtained from aqueous solutions. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 5103-5110.
- Eduardo Muñoz, J. P.-P. (2019). Interaction between nitroxyl radicals and CdTe quantum dots: T Determination of fluorescence-quenching mechanisms in aqueous solution. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*, 383, 112024.

- Eduardo Muñoz, R. M. (2021). Hydroxyl Radicals Attack CdTe Quantum Dots. *Journal of The Electrochemical Society*, 168, 097503.
- Amin Salehi-Khojin, W. Z. (2012). Nanotubes throw their heat around. *Nature Nanotechnology*, 7, 280-281.
- Bajpayee AG, W. C. (2014). Avidin as a model for charge driven transport into cartilage and drug delivery for treating early stage post-traumatic osteoarthritis. *Biomaterials*, 35, 538-549.
- Chaniotakis, M. F. (2009). Semiconductor quantum dots in chemical sensors and biosensors. *Sensors*, 9(9), 7266-7286.
- Chittreeya Tansakul, E. L. (2010). Distance-Dependent Fluorescence Quenching and Binding of CdSe Quantum Dots by Functionalized Nitroxide Radicals. *J. Phys. Chem. C*, 114, 7793-7805.
- D. J. Norris, M. N. (1993). Size dependent optical spectroscopy of II-VI semiconductor nanocrystallites (quantum dots). *Z. Phys. D.*, 26, 355-357.
- Ekimov, A. I. (1981). Quantum Size Effect in Three-Dimensional Microscopic Semiconductor Crystals. *JETP Lett.*, 34, 345-349.
- Hilmi Volkan Demir, S. N. (2011). Quantum dot integrated LEDs using photonic and excitonic color conversion. *Nano Today*, 6, 632-647.
- K. Tanabe, D. G. (2011). Fabrication of electrically pumped InAs/GaAs quantum dot lasers on Si substrates by Au-mediated wafer bonding. *Phy. Status Solidi*, 8, 319-321.
- Lemon CM, C. P. (2014). Metabolic tumor profiling with pH, oxygen, and glucose chemosensors on a quantum dot scaffold. *Inorg. Chem.*, 53, 1900-1915.
- Maureen A. Walling, J. A. (2009). Quantum Dots for Live Cell and In Vivo Imaging. *Int. J. Mol. Sci.*, 10, 355-357.
- P. Kamat, K. T. (2010). Beyond Photovoltaics: Semiconductor Nanoarchitectures for Liquid-Junction Solar Cells. *Chem. Rev.*, 110, 6664-6688.
- Pombo Barros, V. y. (2011). QUANTUM DOTS: THE NEW CONTRIBUTION OF NANOTECHNOLOGY TO RESEARCH AND MEDICINE. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 5, 69-102.
- R. Debnath, J. T.-A. (2010). Ambient-processed colloidal quantum dot solar cells via individual pre-encapsulation of nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 5952-5953.
- R. Dingle, W. W. (1974). Quantum States of Confined Carriers in Very Thin Al_xGa_{1-x}As - GaAs- Al_xGa_{1-x}As Heterostructures. *Physical Review Letters*, 33, 827-830.
- Xinkun Li, P. J. (2011). A high-performance quantum dot superluminescent diode with a two-section structure. *Nanoscale Research Letters*, 6, 625.