

¿Qué son los Puntos Cuánticos ó Átomos Artificiales? Premio Nobel de Química 2023

Braulio Edgar Herrera-Cabrera¹, Rafael Salgado Garciglia², Víctor Manuel Ocaño Higuera³, Luis Germán López Valdez⁴, Alan Mendoza Alcantara⁵, Francisco Javier Verduzco Miramón⁵ y Hebert Jair Barrales-Cureño⁵

Colegio de Postgraduados, Campus Puebla¹; Instituto de Investigaciones Químico Biológicas², Departamento de Ciencias Químico Biológicas³, Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química⁴; Carrera en Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable⁵

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo², Universidad de Sonora³, Universidad Autónoma Chapingo⁴, Tecnológico Nacional de México⁵

Santiago Momoxpan, Pue.¹; Morelia, Mich.²; Hermosillo, Son.³; Texcoco, Edo. Mex.⁴; Zamora, Mich.⁵;
behc@colpos.mx, rsalgadogarciglia@gmail.com, lgermanlv@taurus.chapingo.mx, alanmendozaalcantara923@gmail.com,
francisco.vm@zamora.tecnm.mx

Autor de correspondencia: hebert.bc@zamora.tecnm.mx

Abstract— The Nobel Prize in Chemistry 2023 consists of international scientific prestige and a prize of eleven million Swedish kronor, which was awarded to three scientists for the discovery and application of quantum dots: Russian physicist Alexei Ekimov, American chemist Louis Brus and French chemist Mounji Bawendi. Ekimov discovered the crystalline form in a glass matrix, Brus demonstrated the quantum effects of free-floating particles in colloidal solutions and Bawendi revolutionized production by creating perfect particles. Applications stand out in biomedicine, chemical industry, renewable energy, electronics and quantum computing. Therefore, the objectives of the present research are to mention the origin, definition, synthesis and applications of quantum dots.

Keyword— *Lyophilic colloids, excitons, nanoscience, nanocrystals, nucleation, quantum dots.*

Resumen— El Premio Nobel de Química 2023 está constituido por otorgar prestigio científico internacional y un premio de once millones de coronas suecas, los cuales se otorgaron a tres científicos por el descubrimiento y aplicación de los puntos cuánticos: físico ruso Alexei Ekimov, químico estadounidense Louis Brus y al químico francés Mounji Bawendi. Ekimov descubrió la forma cristalina en una matriz de vidrio, Brus evidenció los efectos cuánticos de las partículas que flotaban libremente en soluciones coloidales y Bawendi revolucionó la producción al crear partículas perfectas. Las aplicaciones destacan en biomedicina, industria química, energías renovables, electrónica y computación cuántica. Por lo tanto, los objetivos de la presente investigación consisten en mencionar el origen, definición, síntesis y aplicaciones de los puntos cuánticos.

Palabras claves— *Coloides liofílicos, excitones, nanociencia, nanocristales, nucleación, puntos cuánticos.*

I. INTRODUCCIÓN

El Premio Nobel de Química 2023 fue otorgado el 4 de octubre de 2023 por la Real Academia Sueca a tres científicos por el descubrimiento de los puntos cuánticos: al físico ruso Alexei I. Ekimov (78 años) del Instituto Físico-Técnico Ioffe, San Petersburgo, Rusia y Nanocrystals Technology Inc., al químico americano Louis E. Brus (79 años) de la Universidad de Columbia, Nueva York, USA y al químico francés Mounji Bawendi (62 años) del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), Cambridge, USA [1].

Los puntos cuánticos son uno de los sistemas de mayor importancia para la nanociencia. A los puntos cuánticos también se les conoce como “átomos artificiales”, debido a que están construidos en laboratorio y tienen la capacidad de confinar a los electrones en regiones de tamaño nanométrico, miles de veces más pequeñas que el grosor de un cabello humano. Los puntos cuánticos reciben su nombre porque son partículas semiconductoras muy pequeñas, de tan sólo unos pocos nanómetros [2].

Los puntos cuánticos son de tamaño diminuto, miden unas pocas millonésimas de milímetro. El tamaño de los puntos cuánticos determina el color de la luz, la cual emiten al ser estimulados con electricidad. Los puntos cuánticos de menor tamaño son los de color azul, mientras que los puntos cuánticos de mayor tamaño son los amarillos y rojos [3]. Los quantum dots (puntos cuánticos en español) son nanopartículas de materiales semiconductores. Típicamente, pueden contener desde 100 a 100.000 átomos, con un diámetro total de partícula entre 2 a 10 nm, aunque existen con mayores dimensiones [4]. Los puntos cuánticos aportan mayor sensibilidad y durabilidad de la luminiscencia en imágenes de células vivas siendo 1000 veces más brillante comparado con los fluoróforos orgánicos convencionales. La síntesis en caliente se realiza como nanopartículas coloidales en una disolución. Por lo tanto, los objetivos de la presente investigación consisten en mencionar el origen, definición, síntesis y las principales aplicaciones de los valiosos puntos cuánticos.

II. ORIGEN DE LOS PUNTOS CUÁNTICOS

Los puntos cuánticos son nanopartículas formadas por agregados de átomos cuyas propiedades están determinadas por la física cuántica. Se han usado desde hace varios siglos por la humanidad, siendo los vidrieros los responsables de utilizar variados colores de las vidrieras en las catedrales y en vidrios coloreados en yacimientos arqueológicos. Los vidrieros desconocían la razón física, pero aprendieron a fabricar vidrios de vivos colores. Por ejemplo, una mezcla de seleniuro de cadmio y sulfuro de cadmio vuelve el vidrio de color amarillo o rojo según cómo se caliente y se enfríe [5].

Los tres científicos ganadores del Premio Nobel de Química 2023, lograron descifrar que el color tenía su origen en el tamaño de las nanopartículas de oro, plata y cadmio agregadas al vidrio. Ekimov a fines de 1970, midió el tamaño de los cristales del cloruro de cobre, responsable del color de unos vidrios, siendo apenas de 2 nanómetros, mientras que otros medían 30 nanómetros. Ekimov observó que cuanto más pequeñas eran las partículas, más azul era la luz que absorbían.

En 1981, Ekimov publicó su descubrimiento con respecto a la síntesis de nanopartículas con efectos cuánticos dependientes del tamaño, en idioma ruso en una revista soviética, aspecto que pasó desapercibido para Brus, quien estudió fenómenos similares en partículas en suspensión en un líquido en los laboratorios Bell en USA [6]. Gracias al descubrimiento del Dr. Ekimov de los efectos de tamaño cuántico en nanocristales de cloruro de cobre en vidrio comenzaron los estudios de los puntos cuánticos.

En 1983, Brus publicó su descubrimiento del uso de la energía solar para activar reacciones químicas. Brus maximizó la superficie expuesta a la luz, sintetizando nanopartículas de sulfuro de cadmio de tamaños cada vez más pequeños. Al comparar las nanopartículas de 4.5 nanómetros de diámetro con las de 12.5 nanómetros observó que las más pequeñas absorbían luz en el azul en lugar del amarillo. Brus investigó el efecto del tamaño de las nanopartículas en el color de la luz que absorbían. El Dr. Louis E. Brus ha publicado 278 artículos científicos en colaboración con su grupo de investigación.

En 1988, Mounji Bawendi trabajó en investigar el problema de que la síntesis de nanopartículas conducía a una gran variedad de tamaños diferentes por lo que para estudiarlas se tenían que clasificar por tamaño después de su fabricación. En 1993, publicó una técnica de síntesis basada en hacer crecer unas "semillas" (nucleación) de los cristales de forma controlada; con un disolvente adecuado, variando la temperatura de solución logrando hacer crecer a los nanocristales de un tamaño definido. Los nanocristales de Bawendi eran casi perfectos, lo que permitía estudiar sus efectos cuánticos con todo detalle [7]. El Dr. Bawendi ha sido citado más de 13,000 veces en un artículo científico escrito con su grupo de investigación.

III. PROPIEDADES DE LOS CRISTALES

Las propiedades ópticas de los materiales (por ejemplo el color, la luz absorbida y no reflejada) dependen de sus propiedades electrónicas (descritas por la teoría de bandas). La estructura de bandas de un cristal depende de su geometría, siendo diferente en un cristal cerodimensional, unidimensional bidimensional y tridimensional. Un punto cuántico es un material cerodimensional con dimensiones en la escala de los nanómetros (nm), o milmillonésimas de metro; por lo tanto, un punto cuántico es un agregado de miles a decenas de miles de átomos con forma esférica. El tamaño típico de un átomo son 0.2 nm (2 Å), con lo que en 1 nanómetro cúbico caben unos 125 átomos y en 5 nanómetros cúbicos unos 15,600 átomos [8]. La absorción y la emisión óptica de un material depende de su salto de banda (bandgap), la energía E_g que separa las bandas de valencia (VB) y conducción (CB). Mayor energía significa mayor frecuencia y menor longitud de onda, así los fotones azules tienen mayor energía que los fotones rojos. El tamaño de los puntos cuánticos de seleniuro de cadmio (CdSe) se puede ajustar para que su salto de banda recorra casi todo el rango visible del espectro óptico (su bandgap va desde 1.8 eV en 3D hasta 3 eV en los puntos cuánticos más pequeños). Hay muchas otras propiedades fisicoquímicas de los puntos cuánticos que también dependen del tamaño, útiles en sus aplicaciones como catalizadores de reacciones químicas [9].

Además de la reclusión en las tres dimensiones de los puntos cuánticos semiconductores (cerodimensional), otros puntos confinados incluyen: hilos cuánticos (unidimensionales) y pozos cuánticos (bidimensionales) estudiados en espintrónica.

IV. ¿QUÉ SON LOS PUNTOS CUÁNTICOS?

Un punto cuántico es una nanoestructura semiconductor que cuyos excitones se confinan en las tres dimensiones espaciales del movimiento del electrón. Como resultado, tienen propiedades que se encuentran entre las de semiconductores a granel y los de las moléculas discretas. El término "Quantum Dot o Qdots" fue acuñado por Mark Reed, debido a que se sintetizan nanoestructuras que confinan electrones en puntos matemáticos, llamando a éstos puntos cuánticos (quantum dots). Por lo tanto, los puntos cuánticos son nanocristales semiconductores con propiedades fluorescentes y ópticas únicas que bajo radiación emiten luz a longitudes de onda específicas [10]. Los quantum dots absorben luz de un continuo de energías, pero emiten luz de energías discretas (de un solo color) que depende de su tamaño. Por otra parte, la intensidad fluorescente es mayor que la de los fluoróforos (fluorocromo, es un grupo funcional de la molécula que absorberá la energía de una longitud de onda específica) convencionales. Los principales materiales semiconductores de los que están constituidos los quantum dots son sulfuro de cadmio (CdS, 144.46 g/mol, densidad: 4.82 g/cm³), seleniuro de cadmio (CdSe, 197.37 g/mol, densidad: 5.82 g/cm³), telururo de cadmio (CdTe, 240.01 g/mol, densidad: 5.85 g/cm³), fosfuro de indio (InP, 145.79 g/mol, densidad: 4.81 g/cm³, 4,810 kg/m³), sulfuro de zinc (ZnS, 97.47 g/mol, densidad: 4.09 g/cm³) y sulfuro de plomo (PbS, 239.3 g/mol, densidad: 7.6 g/cm³) (Figura 1), ya que éstos poseen unas propiedades electrónicas adecuadas para obtener quantum dots fluorescentes, pero cada uno de estos materiales tienen unas propiedades diferentes como estructura, toxicidad (por liberación de metales), comportamiento óptico o capacidad para unir grupos funcionales a su superficie [11].

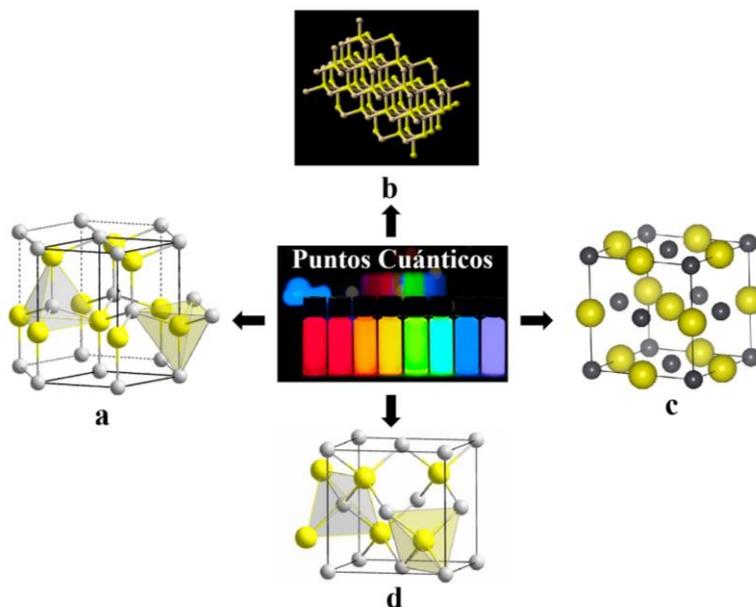


Fig. 1. Semiconductores: a) seleniuro de cadmio , b) sulfuro de cadmio, c) sulfuro de zinc y d) sulfuro de plomo.

V. TAMAÑO DE LOS PUNTOS CUÁNTICOS

Los puntos cuánticos semiconductores están estrechamente relacionados con el tamaño y la forma del cristal individual. El confinamiento cuántico ocurre cuando los electrones están restringidos a moverse en una región demasiado pequeña, como es el caso de los quantum dots menores de 10 nm. Este efecto hace que las propiedades electrónicas y ópticas de los quantum dots sean determinadas por su tamaño. Actualmente los puntos cuánticos están hechos de nanocristales semiconductores de entre 2 y 10 nanómetros de ancho. Para que haya confinamiento los puntos cuánticos deben de tener un tamaño comparable al radio del excitación de Bhor, que es del orden de 10 nm en la mayoría de los semiconductores. Este confinamiento de los electrones en una región suficientemente pequeña da lugar a que se tengan bandas hasta tener niveles cuánticos de energía separados y cuya separación dependerá en forma inversa del tamaño del punto cuántico. Los puntos cuánticos contienen solamente unos pocos miles de átomos y son capaces de emitir y absorber luz a ciertas longitudes de onda determinadas por la energía de los niveles en el punto y no por la energía de la banda prohibida del material. La banda prohibida de un semiconductor se define como la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su estado ligado a un estado libre que le permita participar en la conducción. Como la separación de los niveles depende del tamaño del punto cuántico y la luz emitida se debe a las transiciones entre estos niveles, entonces se puede controlar la longitud de onda de la luz que se emite con el tamaño de los puntos cuánticos [12].

VI. SÍNTESIS DE LOS PUNTOS CUÁNTICOS

Se han desarrollado modelos para la síntesis de puntos cuánticos tales como el de síntesis por inyección en caliente (producción de coloides liofílicos monodispersos) y el método de crecimiento de Stranski–Krastanov. Un método de síntesis de puntos cuánticos es la producción de coloides liofílicos monodispersos (síntesis por inyección en caliente) que sirve para obtener puntos cuánticos de alta calidad con un control preciso del diámetro fino. El proceso es el siguiente: mediante una reacción química a alta temperatura entre precursores de los semiconductores en un disolvente orgánico. Los

cristales de quantum dots se forman mediante un proceso de nucleación y crecimiento. *A posteriori* se realiza un paso de precipitación selectiva para obtener quantum dots del mismo tamaño. Las nanopartículas que se obtienen son solubles en medio orgánico, pero la mayoría de las aplicaciones necesitan que sean solubles en medio acuoso, por lo que, normalmente, la superficie de los quantum dots se modifica con algún polímero que le proporciona solubilidad en agua y capacidad para poder unirse con biomoléculas de interés. Se inyectan los reactivos de elementos organometálicos, los cuales serán los precursores de las nanopartículas de puntos cuánticos, sobre un disolvente que tenga un alto punto de ebullición (a alta temperatura) produciendo una rápida pirólisis (calentamiento a alta temperatura en ausencia de oxígeno). La concentración de elementos organometálicos se incrementa rápidamente, produciéndose una sobresaturación abrupta, generando nucleaciones de los precursores que generaran las nanopartículas. Posteriormente, a la inyección le acontece una caída repentina de la temperatura, deteniendo el crecimiento de los precursores [13]. Luego, se recalienta a la temperatura de crecimiento deseada, sea un crecimiento lento que permitirá controlar el diámetro final de las nanopartículas. La estabilización de la dispersión coloidal resultante se logra con un recocido en un disolvente coordinador pertinente. La producción de coloides liofílicos monodispersos conduce a resultados espectaculares, cantidades macroscópicas de nanopartículas con un tamaño y estructuras muy regulares, pudiéndose observar espectros de absorción óptica demasiado nítidos y espectros de emisión a temperatura ambiente con un alto rendimiento cuántico de alta luminiscencia (cerca del 10 %). Este método abrió la puerta al desarrollo de aplicaciones actuales a gran escala de los puntos cuánticos (Figura 2).

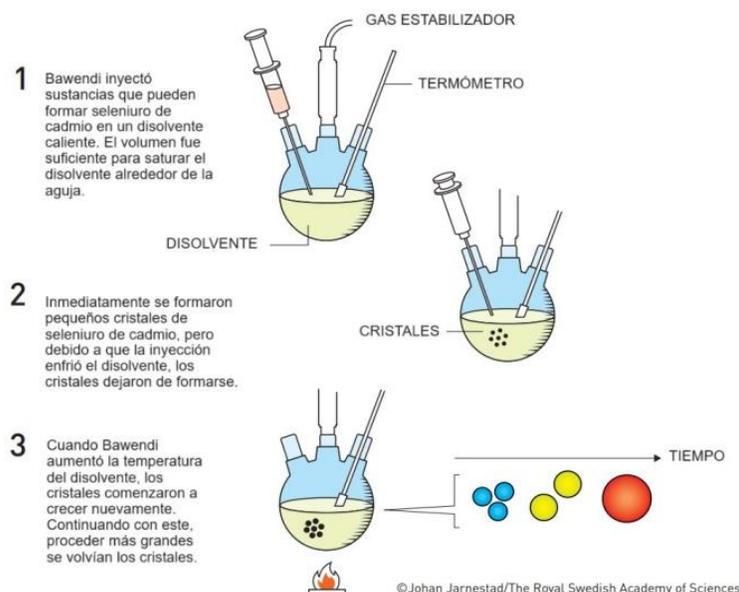


Fig. 2. Síntesis de puntos cuánticos por inyección en caliente (Johand Jarnestad, The Royal Swedish Academy of Science).

La síntesis extracelular de puntos cuánticos de sulfuro de cadmio (CdS) luminiscente se ha logrado también usando cultivo de células vegetales, aunque, una desventaja es la toxicidad del cadmio [14].

VII. APLICACIONES DE LOS PUNTOS CUÁNTICOS

Debido a su comportamiento electro-óptico, absorción y emisión, los quantum dots se emplean en la preparación de paneles o células solares fotovoltaicas por su alta capacidad de absorción de luz reduciéndose los costos, en los sistemas de iluminación de las pantallas de ordenadores, televisiones basadas en tecnología QLED (diodos emisores de luz) debido a sus propiedades electroluminiscentes, es decir, que pueden emitir luz tras aplicarles un voltaje eléctrico, bombillas QLED, donde la Q significa

punto cuántico, transistores, láser diodo, optoelectrónica, fotogeneración de corriente, alumbrado eficiente, así como en pantallas de dispositivos electrónicos ya que consumen poca energía (celulares) [15]. Con puntos cuánticos de materiales semiconductores, como fosforo de indio y arseniuro de indio, se fabrican diodos láser emisores de luz d mayor eficiencia que los actuales.

En biomedicina, los puntos cuánticos se utilizan como biomarcadores de mapeo del tejido biológico y en el estudio de enfermedades, seguimiento de la distribución de fármacos en el organismo, iluminación de endoscopios y sondas médicas, en la obtención de alta resolución de imágenes intracelulares útiles en el diagnóstico, tratamiento de enfermedades mortales como el cáncer a nivel de la observación *in vivo* del proceso tumoral, orientación tumoral, diagnóstico, obtención de tratamientos adecuados para las enfermedades y por su pequeño tamaño se posibilita la introducción en células, e incluso el seguimiento de moléculas individuales [16, 17]. Los puntos cuánticos emiten luz brillante y muy estable permitiendo la obtención de imágenes biomédicas de alto contraste, esto se debe a que la longitud de onda es específica a la que brillan evitando las superposiciones, pudiendo teñir a la vez una variedad de estructuras que con los métodos de tinción tradicionales.

Por ejemplo, Li et al., utilizaron quantum dots multicolor contra tumores en ratones. Los quantum dots modificados con anticuerpos se unen a las células cancerosas logrando su visulización óptica. Además, investigaron el seguimiento de células marcadas con quantum dots en el organismo de los ratones [18].

Otra aplicación es la creación de nanotermómetros luminiscentes para medir la dinámica y distribución del calor mediante la medición de la temperatura intracelular en eventos celulares tales como la división celular (mitosis), los cuales están en función de los cambios en la temperatura [19], esto permitirá monitorizar la detección de enfermedades a nivel celular para desarrollar nuevas técnicas de diagnóstico y terapia, por ejemplo es bien sabido que varias patologías como el cáncer están caracterizadas por la producción de calor [20].

Las aplicaciones de los puntos cuánticos en la industria química se han empleado como catalizadores de reacciones, fotocatalisis y producción de hidrógeno. Su uso más habitual es producir luz coloreada; si los puntos cuánticos se iluminan con luz azul, absorben la luz y la re-emiten con un color diferente que depende de su tamaño. Los puntos cuánticos cambian el color azul en rojo o verde, obteniéndose los tres colores primarios. En comparación con los colorantes orgánicos utilizados mayoritariamente en la actualidad, la luminiscencia de los quantum dots es de mayor estabilidad e intensidad pudiendo utilizarse en el estudio de bioprocesos durante mayor tiempo. Así mismo, los puntos cuánticos forman parte de varias investigaciones experimentales en Química, Física y Biología.

En Química Analítica, los quantum dots se utilizan como marcas fluorescentes en bioensayos. Los puntos cuánticos se conjugan con biomoléculas tales como anticuerpos, oligonucleótidos, enzimas o aptámeros (secuencias de ADN o ARN de cadena sencilla que adoptan la forma de estructuras tridimensionales únicas reconociendo un target específico con alta afinidad) de manera que se pueden detectar diferentes biomarcadores ópticamente, detectando simultáneamente por la diferencia de color en su emisión de luz. Además, se emplean como marca en electroquímica de biosensores.

También, se han obtenido nuevas células fotovoltaicas de tercera generación, las cuales se están trabajando en superficies con puntos cuánticos con un rendimiento mejorado, fabricación de mayor eficiencia para que la energía solar sea más asequible. En la Figura 3 se sintetizan las principales aplicaciones de los puntos cuánticos.

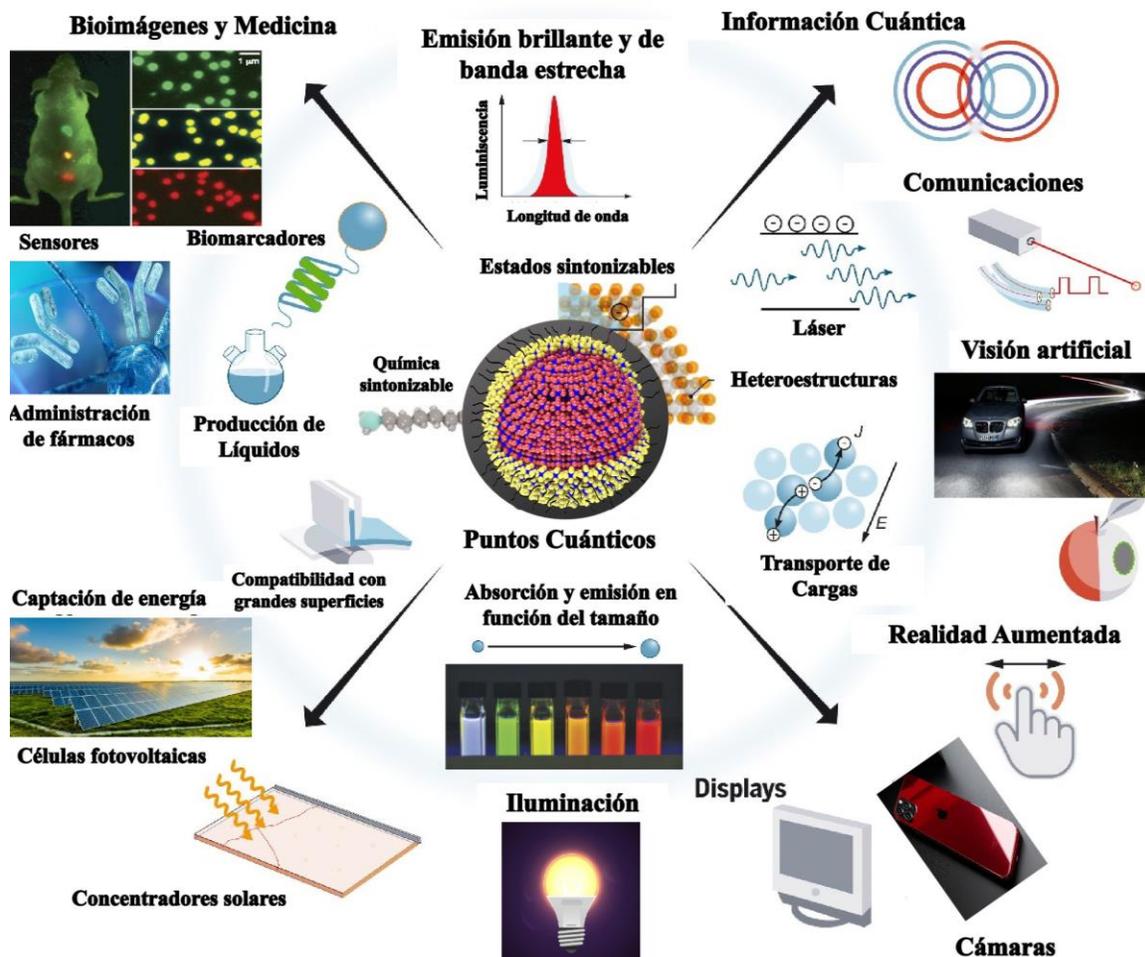


Fig. 3. Aplicaciones tecnológicas de los puntos cuánticos.

La aplicación futura de los puntos cuánticos se está dirigiendo hacia la obtención de energías renovables, electrónica flexible con la creación de sensores diminutos, celdas solares de mayor compactación, computación cuántica avanzada para el diseño de aviones de mayor eficiencia y en la comunicación cuántica cifrada con la esperanza de usarlos como qubits (contracción de quantum y bit, y significa bit cuántico) en ordenadores cuánticos.

Los quantum dots realizados con base de indio biocompatibles (puntos cuánticos de tres nanómetros con un núcleo de fósforo de indio) y amigables con el medio ambiente, se utilizarán a futuro para la obtención de una fuente de energía limpia altamente eficiente a partir de la conversión de biomasa en hidrógeno a partir de luz y agua, dado que el cadmio es tóxico; por otro lado, también se podrán fabricar biosensores de baja toxicidad y materiales ópticos no lineales.

VIII. CONCLUSIONES

Los puntos cuánticos son una de las joyas valiosas de la nanotecnología, cuyas aplicaciones reales se encuentran en muchos productos comerciales. El Premio Nobel de Química refuerza la idea de que no hay aplicaciones tecnológicas sin investigación fundamental o uso del método científico. En la naturaleza, los electrones (carga negativa) se confinan dentro de los átomos, pero su manipulación es costosa y difícil, gracias a los puntos cuánticos, se pueden enlazar a los electrones para que su estudio

sea mucho más sencillo. El Premio Nobel de Química de 2023 es un excelente ejemplo de cómo la investigación básica se conduce a una nueva tecnología con un enorme potencial económico y social de multi-aplicaciones para el beneficio de la humanidad, por lo que este galardón es más que merecido. Estas aplicaciones unidas a la capacidad de visualizar simultáneamente diferentes quantum dots por su diferente color hacen que estas nanopartículas sean icónicas y prometedoras en nuestro presente y en el futuro.

RECONOCIMIENTOS

“Agradecemos al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora y a la Carrera de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable. También se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).”

REFERENCIAS

- [1] P. Joglekar, D. Mandalkar, M. Nikam, N. Pande, and A. Dubal, “Review Article on Quantum Dots: Synthesis, Properties and Application,” *Int. J. Res. Advent. Technol.* vol. 7, pp. 510–515, 2019.
- [2] A. Valizadeh, H. Mikaeili, M. Samiei, S.M. Farkhani, N. Zarghami, M. Kouhi, A. Akbarzadeh, and S. Davaran. “Quantum Dots: Synthesis, Bioapplications, and Toxicity,” *Nanoscale Res. Lett.* vol. 7, 480, 2012.
- [3] D. Vasudevan, R.R. Gaddam, A. Trinchi, and I. Cole, “Core-Shell Quantum Dots: Properties and Applications,” *J. Alloys Compd.* vol. 636, pp. 395–404, 2015.
- [4] S. Coe-Sullivan, “Quantum dot developments,” *Nat. Photonics*, vol. 3, pp. 315–316, 2009.
- [5] P. Joglekar, D. Mandalkar, M. Nikam, N. Pande, and A. Dubal, “Review Article on Quantum Dots: Synthesis, Properties and Application,” *Int. J. Res. Advent. Technol.* vol. 7, pp. 510–515, 2019.
- [6] C. Burda, X.B. Chen, R. Narayanan, M.A. and El-Sayed, “Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes,” *Chem. Rev.* vol. 105, pp. 1025–1102, 2005.
- [7] A.M. Smith, X.H. Gao, and S.M. Nie, “Quantum dot nanocrystals for in vivo molecular and cellular imaging,” *Photochem. Photobiol.* vol. 80, pp. 377–385, 2004.
- [8] D. E. Gómez, M. Califano, and P. Mulvaney, “Optical properties of single semiconductor nanocrystals,” *Phys. Chem.* vol. 8, pp. 4989-5011, 2006.
- [9] D. Vasudevan, R.R. Gaddam, A. Trinchi, and I. Cole, “Core-Shell Quantum Dots: Properties and Applications,” *J. Alloys Compd.* vol. 636, pp. 395–404, 2015.
- [10] P.M. Allen and M. G. Bawendi, “Ternary I-III-VI quantum dots luminescent in the red to near-infrared,” *J. Am. Chem. Soc.* vol. 130, no. 29, pp. 9240, 2008.
- [11] J. Chen, V. P. Zhao, J. Chauhan, C. Cui, D. K. Wong, H. Harris, H.-S. Wei, D. Han, R. K. Fukumura, and M. G. Bawendi, “Compact highquality CdSeCdS core-shell nanocrystals with narrow emission linewidths and suppressed blinking,” *Nature Mat.* vol. 12, pp. 1-7, 2013.
- [12] C.B. Murray, C.R. Kagan, and M.G. Bawendi, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Nanocrystals and Close-Packed Nanocrystal Assemblies,” *Annu Rev Mat Res.* vol. 30, pp. 545-610, 2000.
- [13] M.N. Borovaya, O.M. Burlaka, A.P. Naumenko, Y.B. Blume, A.I. Yemets, “Extracellular Synthesis of Luminescent CdS Quantum Dots Using Plant Cell Culture,” *Nanoscale Res. Lett.* vol. 11, pp. 100, 2016.
- [14] F.U. Haider, C. Liqun, J.A. Coulter, S.A. Cheema, J. Wu, R. Zhang, M. Wenjun, M. Farooq, “Cadmium Toxicity in Plants: Impacts and Remediation Strategies,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.* vol. 211, pp. 111887, 2021.

- [15] X. H. Gao, Y. Y. Cui, R. M. Levenson, L. W. K. Chung, and S. M. Nie, "In vivo cancer targeting and imaging with semiconductor quantum dots," *Nat. Biotechnol.*, vol. 22, pp. 969–976, 2004.
- [16] F. A. Esteve-Turrillas, and A. Abad-Fuentes, "Applications of quantum dots as probes in immunosensing of small-sized analytes," *Biosens. & Bioelectron.*, 2012.
- [17] Rzigalinski, B.A.; Strobl, J.S. Cadmium-Containing Nanoparticles: Perspectives on Pharmacology and Toxicology of Quantum Dots. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2009, 238, 280–288.
- [18] S. Li, W. Su, H. Wu, et al. "Targeted tumour theranostics in mice via carbon quantum dots structurally mimicking large amino acids," *Nat. Biomed. Eng.*, vol. 4, pp. 704–716, 2020.
- [19] B. Hildebrandt, P. Wust, O. Ahlers, A. Dieing, G. Sreenivasa, T. Kerner, R. Felix and H. Riess. "The cellular and molecular basis of hyperthermia," *Crit. Rev. Oncol. Hematol.*, vol. 43, pp. 33-56, 2002.
- [20] P. T. Kuruganti, and H. Qi. "Asymmetry analysis in breast cancer detection using thermal infrared images," *Engineering in Medicine and Biology. 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference, Proceedings of the Second Joint, IEEE*, 2002.