



UNIVERSIDAD AUTONÓMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE PROPIEDADES ÓPTICAS DE PUNTOS
CUÁNTICOS DE CARBONO FUNCIONALIZADOS**

Para obtener el grado de:
Doctor en Ciencias de los Materiales

Presenta:

M. en C. Carlos Alfredo Zamora Valencia

Director

Dra. María Isabel Reyes Valderrama

Codirectora

Dr. Ventura Rodríguez Lugo

Mineral de la Reforma, Hgo., a Abril de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 25 de marzo de 2026

Número de control: ICBI-D/594/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

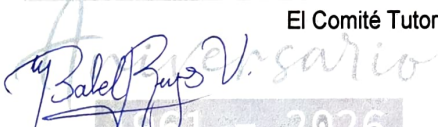
El Comité Tutorial de la tesis titulada "**Evaluación de propiedades ópticas de puntos cuánticos de carbono funcionalizados.**", realizado por el sustentante **Carlos Alfredo Zamora Valencia** con número de cuenta **415854** perteneciente al programa de **Doctorado en Ciencias de los Materiales (tradicional)**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial


Dra. María Isabel Reyes Valderrama
Directora de tesis


Dr. Ventura Rodríguez Lugo
Codirector


Dra. Daniela Edith Salado Leza
Titular


Dr. Eleazar Salinas Rodríguez
Suplente


Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director de ICBI


Ciudad del Conhecimento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. P. C. 42001

Teléfono: 52 5771 71720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

GVRIBO

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

El presente trabajo fue realizado en el laboratorio de Materiales Avanzados del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACTyM), adscrito al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), bajo la dirección de la Dra. María Isabel Reyes Valderrama y del Dr. Ventura Rodríguez Lugo. Asimismo, se contó con el valioso apoyo de la Dra. Daniela Edith Salado Leza, del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). De igual forma, se recibió colaboración del Dr. Vicente Garibay Flebes, del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), del Dr. Efraín Rubio Rosas, del Centro Universitario de Vinculación y Transferencia de Tecnología (CUVyTT) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), y del Dr. Demetrio Mendoza Anaya del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Se agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con el número de beca 2019-000002-01NACF-09398, dentro del programa 004192 - Doctorado en Ciencia de los Materiales.

“La flor que florece en la adversidad, es la más rara y hermosa de todas”

-Fa Zhou (Padre de Mulán)

Agradecimientos y dedicatorias

A mi padre eterno:	Infinitas gracias por darme la bendición de la vida, por prestarme parte de su sabiduría, por guiarme y nunca dejarme solo. No hay palabras que describan todo lo que hace y da por mí.
A mis santos:	Gracias por su cobijo, por abrirme los caminos y cuidarme de todo lo malo que me hacen y desean. Por darme una segunda oportunidad en la fe, que sigan las bendiciones para mí. Maferfum La Osha
A mi guía espiritual	Gracias por nunca dejarme solo en los momentos donde perdí la fé, por esos momentos grises donde sentí todo perdido siempre existió un color en mí, porque sin él no estaría terminando este escrito. Gracias por su guía tanto material como espiritual, aunque soy un mal alumno pongo todo de mi parte para seguir haciendo el bien, guiando y ayudando a los que se acercan conmigo con la bendición de mi Padre y Santos.
A la madre naturaleza:	Gracias por compartir sus frutos para el desarrollo de esta investigación y ser tan buena conmigo, dejarme sentir el calor del fuego, la dureza de la tierra, las caricias del viento y sanarme con el agua.
A mis padres y hermanos:	Gracias a mis padres Estanislao Zamora González y Alma Delia Valencia Martínez por su invaluable tiempo, guía, consejos y regaños, aunque no he sido un hijo ejemplar lo doy todo por ellos y espero que se sientan orgullosos de mí, de mi trabajo y casi todo lo que hago. Gracias a mis hermanos por esos pequeños momentos de felicidad, tristeza y enojos, estoy muy orgullo de sus logros y sé que lograran cumplir sus sueños y metas. Gracias a la contadora Karla Delia Zamora Valencia por su carácter y frialdad para hacerme razonar y buscar en mí esa disciplina, gracias a la bailarina Dulce María Zamora Valencia por su dulzura, sus risas, apoyo y cobijo en momentos difíciles gracias por esos paso para bailar y disfrutar de la vida, gracias al futuro contador Omar Tadeo Zamora Valencia por hacerme ver las cosas de otro modo ya que siempre tiene un punto de vista diferente y hacerme reflexionar sobre mi paciencia con ese carácter tan similar que tenemos.
A mi familia:	Gracias a mis abuelos por todo su amor y cariño. Gracias a “la Titita” por sus consejos, por sus refranes, sus frases célebres y su comida; gracias a “Papay” por su carácter decisivo y su apellido, que sigan los triunfos para los Zamoras. Gracias a mi abuela Lupe por su cuidado y cariño, gracias al abuelo el famoso Manolo que se nos adelantó un poquito, en el camino nos encontraremos para seguir cantando y disfrutando como él solo sabe. Gracias a mis tíos por su apoyo emocional, espiritual y económico dentro mi camino, gracias a mi tía

	Lupe por su cariño de segunda madre, a mi Tía Ivonne por ayudarme a conocer más mi espiritualidad, al Alfredin por todo ese apoyo en algunos proyectos, al Tío Oscar por esos domingos de cervezas que me hacían olvidarme del trabajo, a mi padrino Omar por sus consejos en la parte profesional, al Me por ser como un segundo padre y ayudarme en todo momento en cualquier ámbito, el Kikin por todos esos momentos de risas y bullying, a Miguel y Manuel por estos últimos días donde convivimos más, por ultimo pero no más importante un abrazo hasta el cielo a mi tía la más chiquita que donde quiera que esté es una luz en mi vida.
A mis exparejas:	A Susana, por el tiempo vivido, apoyo y consejos de vida que me han enseñado a ser mejor persona, ya que sin su apoyo no hubiera termina la maestría y comenzado el doctorado. Donde quiera que este, tiene mis mejores deseos en esta tu nueva etapa en su vida que pueda vivir plena y disfrute de su pequeña. A Ángela, Infinitas gracias por darme ese abrazo y apoyo emocional cuando más lo necesitaba. Muchas gracias por esos momentos compartidos donde reímos, jugamos, comemos, bebemos y disfrutamos de compartir el momento exacto. Gracias por ese tiempo compartido y deseo que ahora en tu nueva etapa seas feliz y no te falte la felicidad con tu nueva pareja. Gracias por ayudarme a ver la vida de una forma diferente, a ver que entre mayores dificultades que te pone la vida siempre existirá un motivo para estar alegre. Te amo
A mis amigos y compañeros:	A mis carnales Sonia y Carlos por su abrigo dentro de su familiar por dejarme ser parte de ustedes y hacerme sentir esa amistad, por esos bailes y reuniones que me despejan de lo laboral y cargan pila para seguir dándole con ganas. A mis hermanos no sanguíneos Paco, Marisol por ese apoyo incondicional en todo momento, a mis camaradas Isaac y Angélica por su amistad. A mis compañeros del programa de maestría y doctorado que hicieron este viaje más ameno con las fiestas, reuniones y convivios, Flor, Zinohe, Víctor, Polo, el Dr. Daniel, la Dra. Ingrid, Zury, Emiliano, Edgar, Yaneli, Blanquita, al Dr. Damián y los Bolarines. A mis nuevos compañeros de la UTTEC, la Dra Mónica que la considero una guía y un ejemplo a seguir para transmitir conocimientos y ayudar a los futuros investigadores a amar y sentir la ciencia, a la Dra Nikte, a la maestra Lulú, la maestra Zuri y la Ingeniero Consuelo por su apoyo y amistad en esta etapa.
A mis catedráticos:	A la Dra. Isabel por su apoyo y paciencia dentro de mi formación, por darme la oportunidad de salir adelante y ayudarme en todo momento.

	Al Dr.Ventura por toda la presión y asesorías en todos los proyectos a realizar y seguir motivándome a seguir en la investigación. A la Dra. Daniela por todo el conocimiento y revisiones que me ayudan a generar más herramientas para mi formación.
A mis estudiantes:	Por todas esas pláticas dentro del salón y laboratorio que me ayudan a mejorar, gracias por su coraje y entrega para que crezca el #TeamNano. A mis mejores elementos Ángeles por esa confianza y buena vibra en cada momento dentro y fuera de la universidad, Génesis por esas pláticas y acompañamiento en la vida y la ciencia. A Cecilia y Clara que gracias a ella he aprendido mucho de la vida, a que no solo es ser maestro es ser una guía y psicólogo.

Resumen

En el presente trabajo se sintetizaron diferentes sistemas de puntos cuánticos de carbono (Carbon quantum dots “CQDs”) utilizando el método hidrotermal, abordando de manera inicial un sistema de CQDs desnudos, presentes en soluciones coloidales, posteriormente dos sistemas obtenidos al modificar la superficie con polietilenglicol (PEG -CQDs) y quitosano (Ch-CQDs). En donde el último sistema, consiste en una síntesis dual de un material compuesto Fe_3O_4 -CQDs con matriz de magnetita y reforzante de CQDs en fase sólida y en fase líquida una solución coloidal de partículas de carbono con iones Fe^{3+} , Fe^{2+} , Na^+ y Cl^- (L-CQDs).

Para la caracterización estructural y composición en los diferentes sistemas de CQDs, se emplearon las técnicas de Microscopia Electrónica de Transmisión (MET) en los CQDs, PEG-CQDs y Ch-CQDs y Microscopía Electrónica de Barrido para los compuestos Fe_3O_4 -CQDs para la determinación de la morfología y tamaños de las partículas; difracción de rayos X (DRX) en los CQDs y Fe_3O_4 -CQDs obteniendo información sobre la estructura y su modificación así como espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier y espectroscopia Raman para inferir sobre la interacción de los grupos orgánicos en la superficie de todos los sistemas obtenidos.

La evaluación de las propiedades ópticas de los diferentes sistemas de CQDs obtenidos se realizó mediante técnicas de caracterización como espectroscópicas de fotoluminiscencia (FL) y absorbancia ultravioleta-visible (UV-Vis). Por FL se obtuvo las ventanas de emisión, es decir, la dependencia de la longitud de onda de emisión con respecto a la longitud de onda de excitación teniendo emisiones del color violeta hasta verde, para los CQDs, los PEG-CQDs y Ch-CQDs presentan emisiones del azul-cian hasta el verde, los Fe_3O_4 -CQDs en comparación con los otros sistemas se recorre hasta el verde y amarillo, por último, los L-CQDs presentan emisión en los 7 colores del espectro visible. Los diferentes sistemas de CQDs presentan diferentes longitudes de emisión máximas, teniendo para los CQDs una emisión a 508 nm con una excitación de 460 nm, los PEG-CQDs fueron excitado a una longitud de onda de 440 nm y presentaron una emisión a los 514 y 527 nm, los Ch-CQDs mostraron mayor intensidad al ser excitadas a una longitud de onda de 440 nm con respuesta de emisión los 507 nm, en el sistema Fe_3O_4 -CQDs exhibieron una emisión a los 530 y 547

nm al ser excitados a los 480 nm y por último, los L-CQDs tienen emisión a los 466 y 540 nm al ser excitados a los 380 nm. Mediante la caracterización por UV-Vis se terminaron las longitudes de absorción de los sistemas de CQDs dichos valores rondan entre los 200 a los 300 nm.

Para su aplicación en la generación de bioimágenes se analizó la viabilidad celular con respecto al material en líneas celulares CP3 (cáncer de próstata) a diferentes tiempos de incubación de 2, 12 y 24 h mediante ensayos MTT en el compuesto Fe_3O_4 -CQDs obteniendo mejores resultados en la citotoxicidad a menor cantidad de carbono en material.

Los sistemas CQDs obtenidos presentan propiedades ópticas sintonizables según su composición y superficie, destacando los L-CQDs por su amplia ventana de emisión y los Fe_3O_4 .CQDs por su potencial uso en aplicaciones biomédicas como agentes de contraste para bioimagenología, gracias a su combinación de propiedades luminiscentes y magnéticas, junto con una baja citotoxicidad.

Abstract

In the present work, various CQD systems were synthesised using the hydrothermal method. Initially, bare CQDs in colloidal solution were obtained, followed by two systems modified at the surface level with polyethylene glycol (PEG-CQDs) and chitosan (Ch-CQDs). A final system was produced via a dual synthesis involving a Fe_3O_4 -CQD composite material, where magnetite serves as the solid matrix and CQDs as the reinforcing agent; in the liquid phase, a colloidal solution of carbon particles with Fe^{3+} , Fe^{2+} , Na^+ , and Cl^- ions (L-CQDs) was formed.

Structural characterization and compositional analysis of the different CQD systems were conducted using Transmission Electron Microscopy (TEM) for the CQDs, PEG-CQDs, and Ch-CQDs, and Scanning Electron Microscopy (SEM) for the Fe_3O_4 -CQD composites to determine morphology and particle size. X-ray diffraction (XRD) was employed for CQDs and Fe_3O_4 -CQD to provide insight into structural features and modifications. Fourier-transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopy was used to infer interactions of organic groups on the surface of all synthesized systems.

The optical properties of the CQD systems were evaluated through photoluminescence (PL) and ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy. PL analysis revealed emission windows dependent on excitation wavelength. The bare CQDs exhibited emissions from violet to green. The PEG-CQDs and Ch-CQDs displayed emissions from blue-cyan to green. The Fe_3O_4 -CQD demonstrated a red-shifted emission, ranging from green to yellow, while the L-CQDs exhibited broad-spectrum emission across all seven colors of the visible range. Maximum emission wavelengths varied among the systems: bare CQDs emitted at 508 nm when excited at 460 nm; PEG-CQDs showed emissions at 514 and 527 nm upon 440 nm excitation; Ch-CQDs had their most intense emission at 507 nm, also excited at 440 nm. The Fe_3O_4 -CQD exhibited emissions at 530 and 547 nm when excited at 480 nm. Finally, L-CQDs emitted at 466 and 540 nm upon excitation at 380 nm. UV-Vis characterization revealed absorption peaks ranging between 200 and 300 nm for the different CQD systems.

For bioimaging applications, the cytocompatibility of the materials was assessed using MTT assays on CP3 prostate cancer cell lines at incubation times of 2, 12, and 24 hours. The Fe_3O_4 -

CQD composite demonstrated improved cytotoxicity performance with lower carbon content.

The synthesized CQD systems exhibit tunable optical properties depending on composition and surface chemistry. Notably, the L-CQDs stand out for their broad emission spectrum, while the Fe_3O_4 -CQD show promising potential in biomedical applications as contrast agents for bioimaging, due to their combined luminescent and magnetic properties along with low cytotoxicity.

Índice

Resumen	i
Abstract	iii
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xi
Introducción	1
Objetivos	5
General	5
Específicos	5
Capítulo 1. Estado del arte	6
1.1. Puntos cuánticos de carbono	7
1.2. Propiedades	10
1.2.1. Composición y estructura	10
1.2.2. Propiedades ópticas	15
1.2.2.1. Propiedades de absorbancia	15
1.2.2.2. Propiedades de fotoluminiscencia	17
1.3.1. Síntesis hidrotermal	30
1.3.1.1. Precursores	32
1.4. Modificación estructural o superficial	33
1.4.1. Modificación estructural (Dopaje estructural)	34
1.4.2. Modificación de superficie	36
1.5. Aplicaciones biológicas de bioimagen	39
1.5.1. Evaluación de citotoxicidad y viabilidad celular	40
1.5.2. Generación de imagen celular con CQDs	43
Capítulo 2. Experimental	47
2.1. Materiales y reactivos	48
2.2. Metodologías experimentales	48
2.2.1. Síntesis CQDs	48
2.2.2. Síntesis de CQDs PEGilados	49
2.2.3. Síntesis de CQDs-Ch	50
2.2.4. Funcionalización con Fe ₃ O ₄	51
2.3 Ensayo MTT	52
2.3.1. Preparación de las células	52

2.4. Bioimágenes celular.....	54
2.4.1. Preparación de las células y del material	54
2.4.2. Realización de las bioimágenes	54
2.5. Caracterización de los CQDs	55
2.5.1. Microscopía electrónica de barrido y transmisión	55
2.5.2. Microscopía electrónica de transmisión	55
2.5.3. Difracción de rayos X.....	55
2.5.4 Espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier-Raman.....	56
2.5.5. Espectroscopia de absorción UV-Vis	56
2.5.6 Espectroscopia de fotoluminiscencia	56
2.6 Cálculos	57
2.6.1 Energía de banda prohibida.....	57
2.6.2 Rendimiento Cuántico	57
2.6.3 Tamaño de cristalito.....	58
Capítulo 3. Resultados	59
3.1. Síntesis de CQDs	60
3.1.1. Análisis químico y estructural.....	60
<i>Microscopia electrónica de transmisión (TEM)</i>	60
<i>Caracterización por DRX</i>	63
<i>Raman y FTIR</i>	63
3.1.2. Mecanismo de formación de los CQDs.....	65
<i>Hidrólisis de pectina</i>	65
<i>Oxidación de Vitamina C</i>	67
<i>Deshidratación de fructosa</i>	69
<i>Polimerización por condensación de alcoholes para formar éteres</i>	72
<i>Posible nucleación y formación de los CQDs</i>	74
3.1.3. Propiedades ópticas.....	74
<i>Absorción y energía de banda prohibida</i>	74
<i>Fotoluminiscencia</i>	76
3.2. CQDs PEGilados	79
3.2.1. Análisis químico y estructural.....	80
<i>TEM</i>	80
<i>FTIR</i>	82

3.2.2. Formación y modificación superficial	83
3.2.3. Propiedades ópticas	85
Absorción y energía de banda prohibida	85
Fotoluminiscencia	88
3.3. CQDs funcionalizados con quitosano	92
3.3.1. Análisis químico y estructural	93
TEM	93
FTIR	95
3.3.2. Formación y modificación superficial	96
3.3.3. Propiedades ópticas	98
Absorción y energía de banda prohibida	98
Fotoluminiscencia	100
3.4. Funcionalización con Fe_3O_4	104
3.4.1. Análisis químico y estructural	104
MEB	104
DRX	109
FTIR	111
3.4.2. Formación y modificación superficial/estructural	113
Fe_3O_4 y Fe_3O_4 -CQDs	113
CQDs y L-CQDs	114
3.4.3. Propiedades ópticas	115
Absorción y energía de banda prohibida	115
Fotoluminiscencia	118
3.4.4. Viabilidad celular	122
3.4.5. Generación de imágenes celulares	122
Capítulo 4. Discusión	124
4.1 Síntesis CQDs	125
4.2 CQDs PEGilados	130
4.3. CQDs funcionalizados con quitosano	136
4.4. Funcionalización con Fe_3O_4	140
Conclusiones	147
Conclusiones	148
Recomendaciones	148

Referencias	149
Referencias.....	150
Productos	177
Artículos	178
Participación en congresos	180
Simposio “de Investigación en Ciencias de los Materiales “	180
Congreso “Estatad de investigación en Ciencias de los Materiales”	181
Encuentro “Participación de la Mujer en la Ciencia”	182
International Materials Research Congress	183
Nanotech Congress and Annual Meeting of the Condensed Matter & Nanotechnology Division.....	185
Cursos y talleres	188
Organización de eventos	189
Premios en presentaciones.....	189
Revisor de revistas.....	190

Índice de figuras

Figura 1. 1. Demostración de la clasificación de las nanopartículas 0D, 1D, 2D y 3D, según sus dimensiones y su confinamiento cuántico.....	8
Figura 1. 2. Diferencia estructural de los diferentes puntos cuánticos a base de carbono. ...	9
Figura 1. 3. Esquematización de las diferentes aplicaciones de los CQDs.	10
Figura 1. 4. Diferentes caracterizaciones realizadas a los CQDs para la determinación de sus propiedades de composición y estructural.....	12
Figura 1. 5. Transiciones electrónicas provocadas en los CQDs.	16
Figura 1. 6. Cambio del Eg en relación del tamaño y emisión de los CQDs.	17
Figura 1. 7. Dependencia de la longitud de onda de excitación en la emisión de los CQDs.	18
Figura 1. 8. Efecto de quenching en lo CQDs.	24
Figura 1. 9. Diferentes tipos de quenching en partículas luminiscentes.	25
Figura 1. 10. Mecanismo de luminiscencia por efecto del confinamiento cuántico en los CQDs.	26
Figura 1. 11. Mecanismo de luminiscencia por efecto del estado de superficie en los CQDs.	27
Figura 1. 12. Mecanismo de luminiscencia por efecto de una fluorescencia molecular o tuneada en los CQDs.	28
Figura 1. 13. Rutas de síntesis de los CQDs.	29
Figura 1. 14. Proceso de formación general de los CQDs.....	31
Figura 1. 15. Modificación estructural o dopaje estructural de los CQDs con diferentes heteroátomos.....	35

Figura 1. 16. Modificación superficial con diferentes ligandos.	37
Figura 1. 17. Diferentes aplicaciones biológicas para los CQDs.	40
Figura 1. 18. Generación de biomagen celulares a partir de la excitación multicanal.	44
Figura 2. 1. Metodología experimental para la síntesis de CQDs desnudos.	49
Figura 2. 2. Metodología experimental para la síntesis de los PEG-CQDs.	50
Figura 2. 3. Metodología experimental para la síntesis de los Ch-CQDs.	51
Figura 2. 4. Metodología experimental para el compuesto de Fe ₃ O ₄ -CQDs y los L-CQDs	52
Figura 2. 5. Diagrama para los pozos del ensayo MTT.....	54
Figura 2. 6. Diagrama para los pozos para la generación de imagen celular.	55
Figura 3. 1. Imágenes TEM de los CQDs a) durazno, b) fresa, c) guayaba, d) pera y e) plátano.	61
Figura 3. 2. Histograma de distribución de tamaño de los CQDs a) durazno, b) fresa, c) guayaba, d) pera y e) plátano.	62
Figura 3. 3. Patrones de difracción de las diferentes muestras de CQDs.	63
Figura 3. 4. Espectros Raman de las diferentes muestras de CQDs.	64
Figura 3. 5. Espectros FTIR de las diferentes muestras de los CQDs.	65
Figura 3. 6. Mecanismo de hidrólisis de la pectina para la formación de los CQDs.	67
Figura 3. 7. Mecanismo de oxidación de vitamina C para la formación de los CQDs.	69
Figura 3. 8. Mecanismo de deshidratación de fructosa para la formación de los CQDs.	71
Figura 3. 9. Mecanismo de polimerización por condensación de alcoholes para formar éteres previos a los CQDs.	73
Figura 3. 10. Mecanismo de posible nucleación y formación de los CQDs.	74
Figura 3. 11. Espectros de absorción UV-Vis de las diferentes muestras de CQDs.	75
Figura 3. 12. Gráfico de Tauc para el cálculo de la banda prohibida en las muestras de CQDs.	76
Figura 3. 13. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación en los CQDs para la determinación de sus propiedades de phototuning.	77
Figura 3. 14. Espectros de fotoluminiscencia en todas las muestras de CQDs a una longitud de onda de excitación de 460 nm.	78
Figura 3. 15. Imágenes TEM de los CQDs con a) 0 g, b) 0.25 g, c) 1 g de PEG y al cambio de pH d) medio ácido (pH 2) y e) en medio básico (pH 8) con 0.5 g de PEG en ambas muestras.	81
Figura 3. 16. Histograma de distribución de tamaño de los CQDs sin presencia de PEG.	82
Figura 3. 17. Espectros FTIR a) para el cambio de masa de PEG en los CQDs y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.	83
Figura 3. 18. Síntesis y formación de los CQDs por hidrotermal.	84
Figura 3. 19. Recubrimiento superficial de los CQDs con PEG.	85
Figura 3. 20. Espectros UV a) para el cambio de masa de PEG en los CQDs y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.	86
Figura 3. 21. Gráfico de Tauc para el cálculo de la banda prohibida a) para el cambio de masa de PEG en los CQDs y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.	87
Figura 3. 22. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación para la determinación de las propiedades de phototuning a) en los CQDs y b) para los PEG-CQDs.	89
Figura 3. 23. Espectros de fotoluminiscencia a) para el cambio de masa de PEG en los CQDs y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.	91

Figura 3. 24. Imágenes TEM de los CQDs con a) 0 g, b) 0.25 g, c) 0.5 g, d) 0.75 g y d) 1 g de quitosano.	94
Figura 3. 25. Espectros FTIR de las diferentes muestras de Ch-CQDs.	95
Figura 3. 26. Proceso de formación de los CQDs en la reacción hidrotermal a partir de la calabaza.	97
Figura 3. 27. Interacción entre los CQDs y el quitosano.	98
Figura 3. 28. Espectros UV de las diferentes muestras de Ch-CQDs.	99
Figura 3. 29. Gráfico de Tauc para el cálculo de banda prohibida en las diferentes muestras de Ch-CQDs.	100
Figura 3. 30. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación para la determinación de las propiedades de phototuning de los CQDs con a) 0 g, b) 0.25 g, c) 0.5 g, d) 0.75 g y d) 1 g de quitosano.	101
Figura 3. 31. Máximos en la intensidad de todas las muestras de Ch-CQDs a las diferentes longitudes de onda de excitación.	102
Figura 3. 32. Espectros de fotoluminiscencia en las diferentes muestras de Ch-CQDs, fotográfica del cambio de coloración en las muestras de CQDs y Ch-CQDs bajo luz visible y luz ultravioleta.	103
Figura 3. 33. Imágenes MEB de a) Fe_3O_4 , b) Fe_3O_4 con 10 mL, c) Fe_3O_4 con 20 mL, d) Fe_3O_4 con 30 mL y Fe_3O_4 con 40 mL.	105
Figura 3. 34. Histograma de distribución de tamaños de las partículas de a) Fe_3O_4 , b) Fe_3O_4 con 10 mL, c) Fe_3O_4 con 20 mL, d) Fe_3O_4 con 30 mL y Fe_3O_4 con 40 mL	106
Figura 3. 35. Imágenes MEB con más resolución en las partículas de a) Fe_3O_4 , b) Fe_3O_4 con 10 mL, c) Fe_3O_4 con 20 mL, d) Fe_3O_4 con 30 mL y Fe_3O_4 con 40 mL para observar el decorado superficial.	109
Figura 3. 36. Patrones de difracción de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs....	111
Figura 3. 37. Espectros FTIR de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.	112
Figura 3. 38. Reacción y formación de Fe_3O_4 y Fe_3O_4 -CQDs mediante síntesis hidrotermal.	114
Figura 3. 39. Reacción y formación de los CQDs y L-CQDs mediante la síntesis hidrotermal.	115
Figura 3. 40. Espectros UV de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.	116
Figura 3. 41. Gráfico de Tauc para el cálculo de banda prohibida de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.	117
Figura 3. 42. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación para la determinación de las propiedades de phototuning de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.	119
Figura 3. 43. Espectros de fotoluminiscencia de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.	120
Figura 3. 44. Cálculo de las coordenadas cromáticas de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.	121
Figura 3. 45. Viabilidad celular en las muestras de Fe_3O_4 -CQDs mediante ensayos MTT en a) 24 h y b) 48 h de incubación.	122
Figura 3. 46. Generación de imágenes celulares con Fe_3O_4 -CQDs en tiempos de 2, 12 y 24 h de incubación en campo claro, canal azul, canal verde, canales verde y azul y todos los canales	123
Figura 4. 1. Modelo de la estructura de los CQDs y la generación de transiciones electrónicas.	128

Figura 4. 2. Niveles de energía relacionados al Eg.	132
Figura 4. 3. Emisión y pérdida de la luminiscencia por queanching en los CQDs y PEG-CQDs.	133
Figura 4. 4. Modelo de niveles de energía de Fermi para el aumento en la intensidad de fotoluminiscencia al cambio de pH.	134
Figura 4. 5. Modelo de la perdida de luminiscencia al cambio de masa de quitosano al generar o evitar las transiciones radiativas.	138
Figura 4. 6. Forma de interacción entre las diferentes partículas por enlaces coordinados y dopaje.	142
Figura 4. 7. Modelos del cambio en la luminiscencia de las muestras de a) Fe ₃ O ₄ -CQDs y b) L-CQDs.	144

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Comparación sobre el cambio de la composición y estructura en los CQDs según los precursores, métodos y condiciones de síntesis.	12
Tabla 1. 2. Comparación en las propiedades de phototuning de los CQDs reportados.	18
Tabla 1. 3. Comparación en grupos fluoróforos para la determinación de QY.	20
Tabla 1. 4. Comparación en la modificación del QY y sus factores.	21
Tabla 1. 5. Comparativa entre los métodos de síntesis de CQDs considerando los principales aspectos durante su obtención.	30
Tabla 1. 6. Comparativa de rentabilidad y el rendimiento cuántico (QY) de diferentes precursores orgánicos empleados en la síntesis de CQDs.	33
Tabla 1. 7. Comparativa bibliográfica en el heteroátomo dopante, el efecto que provoca y la aplicación de los diferentes CQDs reportados.	35
Tabla 1. 8. Comparativa bibliográfica de iones ligando, propiedades modificadas y aplicaciones de los CQDs.	37
Tabla 1. 9. Comparativa bibliográfica de polímeros utilizados para modificar la superficie de los CQDs.	38
Tabla 1. 10. Comparativa bibliográfica de pequeñas moléculas orgánicas que modifican la superficie de los CQDs y su efecto en las propiedades y aplicaciones.	38
Tabla 1. 11. Comparativa bibliográfica de biomoléculas que modifican la superficie de los CQDs, mecanismo de acoplamiento y aplicaciones biomédicas.	39
Tabla 1. 12. Comparativa bibliográfica en la evaluación de la viabilidad celular en los CQDs, considerando a las diferentes líneas celulares, tipos de ensayos y concentraciones evaluadas.	42
Tabla 1. 13. Comparativa bibliográfica sobre la generación de imagen celular con CQDs, indicando líneas celulares, ensayos utilizados, concentraciones evaluadas y resultados clave.	45

Introducción

Los materiales luminiscentes han despertado gran interés en la comunidad científica debido a sus propiedades singulares y a la diversidad de aplicaciones que ofrecen [1]. A partir del descubrimiento de la proteína GFP (Green Fluorescent Protein), se abrió un amplio campo de investigación enfocado en optimizar la fotoestabilidad y la eficiencia cuántica de estos compuestos [2]. En este contexto, surgieron los puntos cuánticos (QDs, por sus siglas en inglés), diminutas nanopartículas semiconductoras con composiciones binarias o terciarias formadas por elementos de los grupos II–VI, III–V y IV–VI de la tabla periódica. Estas estructuras, con tamaños del orden de nanómetros, exhiben confinamiento cuántico, lo que les otorga una notable estabilidad fotoquímica y rendimientos cuánticos de hasta el 50% [3]. Sin embargo, su síntesis convencional suele requerir equipos de alto costo, condiciones estrictas de control y puede generar subproductos con posible impacto ambiental negativo.

En la actualidad se han sintetizado nanomateriales semiconductores similares a base de carbono optimizando propiedades como la biocompatibilidad, solubilidad en agua y ventajas como su fácil conjugación con otras partículas para diversas aplicaciones [4]. El rendimiento cuántico y la estabilidad de estos CQDs dependerán del precursor y método de síntesis ya que existen diversas rutas de síntesis que pueden ir desde métodos físicos como la ablación láser, microondas, tratamientos con plasma, descarga de arco, así como, métodos químicos como la oxidación térmica, deposición de vapor [5]. Sin embargo, estos métodos implican el uso de equipos requieren un control de síntesis complejos causando un alto costo y un efecto dañino al medio ambiente por la liberación de subproductos peligrosos o contaminantes.

Como alternativa, el método hidrotermal ofrece ventajas significativas, como la simplicidad del proceso, condiciones de reacción controladas, menor tiempo de síntesis y bajo costo [6]. Este procedimiento se aplica ampliamente en la síntesis de CQDs, utilizando agua como medio de reacción y precursores naturales por ejemplo, cáscaras de frutas, jugos vegetales u otras fuentes ricas en carbono [7]–[9]. A partir de una gran variedad de materiales vegetales se han obtenido CQDs con diferentes rendimientos cuánticos (QY, por sus siglas en inglés) y tamaños de partícula, dependiendo de la composición química o bromatológica del precursor [10]. En la literatura se pueden encontrar diferentes modelos de formación de CQDs, destacando los que tienen como fuente precursora moléculas orgánicas como 2,3-

Diaminophenazine (DAP) o 2-Amino-3-hidroxyphenazine (AHP) [11], las cuales son moléculas aisladas, mientras que teniendo una fuente vegetal o biomasa como precursor los mecanismos o modelos de formación reportados están incompletos o muy básicos debido a la complejidad de moléculas presentes en los precursores [12].

Otra de las desventajas de usar este tipo de precursores vegetales en la síntesis de CQDs tiene consecuencias en la estructura, presentando diferente ordenamiento en los átomos o ramificaciones en cada partícula, implicando diversidad de grupos orgánicos en la superficie, generando desorden o defectos superficiales que afectan las propiedades de emisión, estabilidad química de los CQDs por la maduración y aumento en el tamaño que estas pueden tener consecuencia de esos defectos [13]. En investigaciones recientes, se ha demostrado que una alternativa para contrarrestar este problema y mejorar las propiedades es el recubrimiento o funcionalización de la superficie en las CQDs. Los defectos superficiales presentes en los CQDs pueden servir como trampa energéticas para los excitones, mientras que la funcionalización ayuda a estabilizar las trampas haciendo eficientes las recombinaciones radiativas [14] aumentando así su rendimiento cuántico. Otra forma en que ayuda la funcionalización es por la estabilización de fuerzas superficiales retardando el crecimiento de partículas efecto de la maduración de Ostwald [15]. Este cambio superficial en los CQDs se puede dar de diferentes formas, en la mayoría de las veces se utilizan polímeros o algunos iones metálicos dentro de la estructura de la partícula que favorecen o brindan nuevas propiedades a los CQDs [16], [17].

En estudios recientes se ha demostrado que la funcionalización de los CQDs con polímeros biocompatibles como el PEG y el quitosano mejora significativamente su estabilidad coloidal, biocompatibilidad y funcionalidad superficial. Por ejemplo, en lo reportado por Hashemzadeh y colaboradores donde sintetizaron un sistema de CQDs derivados de biochar y decorado con quitosano demostrando una interacción por enlaces π - π y enlaces de hidrogeno teniendo un cambio en las propiedades de emisión [18]. En otra investigación realizada por Li y colaboradores alcanzaron un QY de 73.9% al decorar los CQDs con PEG, así como una alta estabilidad frente a interacciones con iones metálicos ideales para aplicaciones en sensores [19]. Adicionalmente, en lo reportado por Padmaja y colaboradores al sintetizar un nanocompuesto de Fe_3O_4 @CQDs mediante métodos de síntesis verde para

aplicaciones biológicas evaluando su citotoxicidad en líneas celulares HeLa con un IC50 de 78.65 $\mu\text{g/mL}$ indicando una citotoxicidad aceptable para esta línea de aplicación [20]. Estos resultados refuerzan la idea de que la integración de CQDs con polímeros y especies metálicas no solo modula sus propiedades ópticas y superficiales, sino también su interacción con sistemas biológicos, lo que abre la posibilidad de diseñar materiales nanocompuestos con funciones específicas ajustadas al tipo de aplicación deseada.

En la presente investigación se realizó la síntesis de CQDs para su funcionalización con diferentes polímeros como el quitosano y PoliEtilenglicol (PEG); así como iones metálicos de hierro Fe^{2+} y Fe^{3+} en la estructura, evaluando así la respuesta que se tiene en sus propiedades ópticas con respecto a cubrir o generar imperfecciones, cambiando así la ventana de emisión desplazando las emisiones a longitudes de ondas más largas o cortas provocando que emitan en diferentes colores, además que este cambio afecta directamente al ancho de banda prohibida y su comportamiento como material semiconductor. Para analizar la composición, morfología, estructura y tamaño, así como para entender la interacción de los CQDs y las moléculas o iones se caracterizaron por diferentes técnicas de espectroscopias y microscopías. Así mismo se analizó la citotoxicidad mediante ensayos MTT a diferentes concentraciones del material, esto para la generación de bioimágenes celulares o etiquetado de células cancerígenas de tipo CP3 (cáncer de próstata).

En el capítulo I, se establece el estado del arte relativo al pasado, presente y futuro de los CQDs, sus propiedades y funcionalización, así mismo se incluyen los conceptos claves como las características microestructurales y morfológicas de las partículas, las rutas de síntesis, así como sus posibles aplicaciones.

En el capítulo II, se presenta la metodología utilizada para la síntesis de los diferentes sistemas de CQDs, las técnicas de caracterización utilizadas para el análisis de las muestras, así como los cálculos y ecuaciones empleados en la investigación.

En el capítulo III, se muestran los resultados obtenidos con respecto a la caracterización y análisis del efecto que presentan los CQDs y la funcionalización en la estructura o superficie con respecto a las propiedades ópticas como la absorción y emisión, así como la interacción

fisicoquímica entre los CQDs y los polímeros y iones metálicos, igualmente la estructura, morfología y tamaño de las partículas sintetizadas.

En el capítulo IV, se analizan los resultados obtenidos, relacionando la estructura y la superficie de los CQDs con sus propiedades ópticas. Se discute cómo la funcionalización y la interacción con polímeros e iones metálicos influyen en la absorción, emisión y estabilidad del material. Asimismo, se comparan las características estructurales y morfológicas con el comportamiento óptico observado, con el fin de explicar los mecanismos que originan los cambios en la respuesta del sistema y establecer los factores clave que determinan su desempeño.

Finalmente, se incluyen las conclusiones de la investigación.

Objetivos

General

Evaluar el efecto de la funcionalización estructural mediante iones metálicos y de la modificación superficial con polímeros (PEG y quitosano) en los puntos cuánticos de carbono (CQDs), así como la influencia del decorado de nanopartículas de Fe_3O_4 con CQDs sobre sus propiedades ópticas y biocompatibilidad, con el propósito de determinar su potencial en aplicaciones biomédicas.

Específicos

1. Sintetizar CQDs a partir de fuentes vegetales mediante el método hidrotermal, con el fin de proponer un mecanismo detallado de formación y su influencia en la intensidad de luminiscencia y la estabilidad química.
2. Modificar la superficie de los CQDs mediante polímeros como quitosano y PEG, así como su estructura con iones metálicos, optimizando sus propiedades ópticas y su estabilidad para aplicaciones biológicas.
3. Caracterizar los CQDs antes y después de las modificaciones estructurales y superficiales mediante técnicas de espectroscopia y microscopía, evaluando sus propiedades microestructurales y fisicoquímicas.
4. Evaluar la citotoxicidad de los nanocompuestos sintetizados utilizando el ensayo MTT en células CP3, con miras a determinar su viabilidad para aplicaciones biomédicas.



Capítulo 1.

Estado del arte

El presente capítulo aborda los fundamentos teóricos y avances recientes relacionados con la funcionalización estructural y superficial de los CQDs. Se analizan los efectos de la incorporación de iones metálicos en la estructura y de la modificación superficial con polímeros biocompatibles como el PEG y el quitosano, así como la influencia del decorado de nanopartículas de Fe_3O_4 con CQDs sobre sus propiedades ópticas. Asimismo, se presenta una revisión del desarrollo histórico de estos nanomateriales, destacando los principales enfoques, aplicaciones y perspectivas futuras de investigación orientadas a su aprovechamiento en sistemas biológicos y biomédicos.

“El conocimiento depende del tiempo, mientras que el saber no. El conocimiento es una fuente de acumulación, de conclusión, mientras que el saber es un continuo movimiento”.

-Bruce Lee

1.1. Puntos cuánticos de carbono

Los puntos cuánticos de carbono, Carbon dots, también se puede encontrar en la literatura como *carbon quantum dots* o *carbon nanodots*, y en sus abreviaciones *C-Dots*, *CDs* o *CQDs* [21] reciben su nombre por su similitud con los puntos cuánticos inorgánicos ampliamente estudiados [22]. Estos materiales por definición, tienen dimensiones dentro del radio del excitón de Bohr¹ [23] ; es decir, en el caso de los CQDs se trata de partículas menores a 10 nm [24], aunque algunos reportes indican diámetros hasta tamaños de 20 nm [25]. Estas nanopartículas de carbono están compuestas por entre 100 a 100,000 átomos, lo que influye directamente a sus propiedades ópticas y comportamiento electrónico.

Desde el punto de vista estructural los CQDs se consideran partículas semiconductoras de dimensión cero **(Figura 1.1.)** [22], [24], lo que genera un fenómeno de confinamiento cuántico, en el cual las partículas exhiben niveles de energía cuantizados tanto para electrones como para huecos [26]. Este comportamiento es similar al de un solo átomo, por lo que también se les denomina *átomos artificiales*.

¹ El radio del excitón de Bohr es un análogo al radio de Bohr del átomo de hidrógeno, pero considerando la constante dieléctrica del material y la masa reducida del par electrón-hueco.

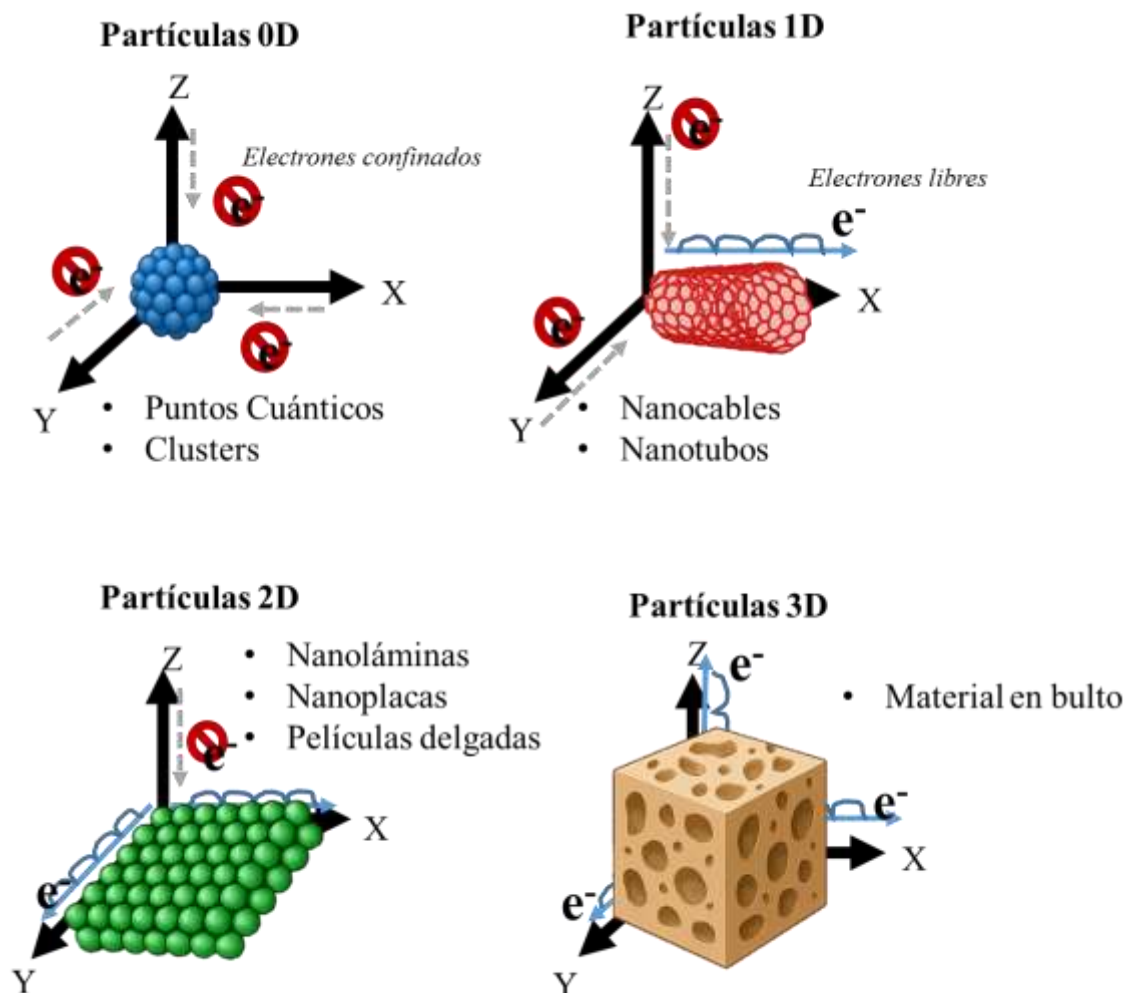


Figura 1. 1. Demostración de la clasificación de las nanopartículas 0D, 1D, 2D y 3D, según sus dimensiones y su confinamiento cuántico.

Generalmente, los CQDs presentan una morfología esférica o cuasiesférica con un núcleo de naturaleza aromática/alifática y grupos funcionales en la superficie [27]. Se pueden clasificar en tres tipos principales (**Figura 1.2.**):

1. **Puntos cuánticos de grafeno**, formados por una estructura de hasta siete capas de grafeno con grupos funcionales orgánicos en la superficie y entre las capas dimensión reportada hasta de 20 nm [28].
2. **Puntos cuánticos poliméricos**, que presentan un núcleo de carbono con cadenas poliméricas y grupos funcionales orgánicos [29].

3. **Puntos cuánticos de carbono**, que cuentan con un esqueleto o núcleo cristalino o semicristalino con hibridaciones sp^2 y sp^3 , una red gráfica (dependiendo del grado de carbonización) y abundantes grupos orgánicos en las superficie [30].

Los grupos funcionales típicos en la superficie de los CQDs incluyen carboxilos ($-COOH$), carbonilos ($-C=O$), hidroxilos ($-OH$), epóxidos ($-C-O-C$) y grupos aminos ($-NH_2$), lo que les confiere una excelente solubilidad en agua y una alta capacidad para la modificación superficial mediante enlaces con otras especies reactivas [31].

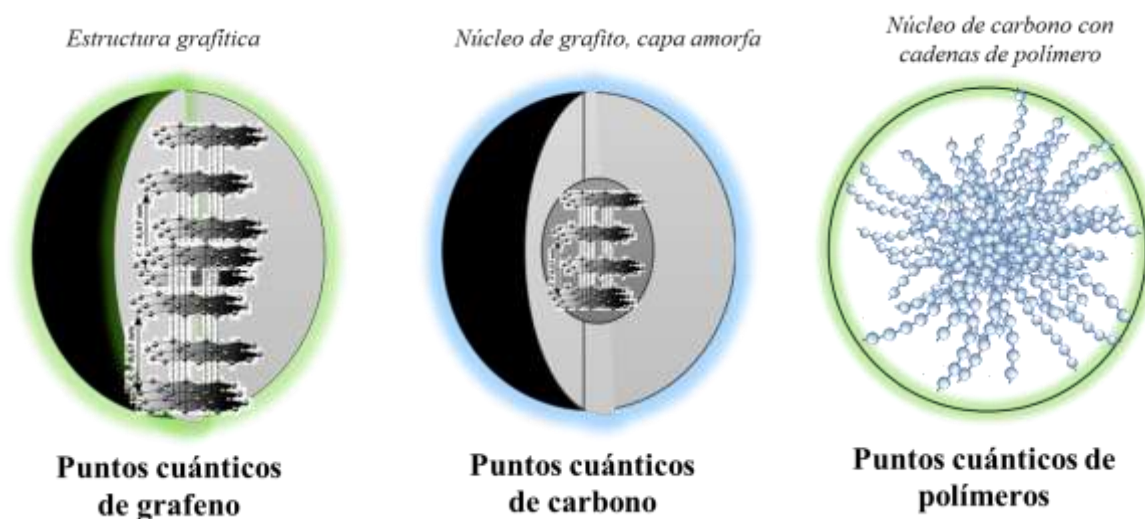


Figura 1. 2. Diferencia estructural de los diferentes puntos cuánticos a base de carbono.

Estas partículas han atraído el interés de la comunidad científica debido a sus propiedades luminiscentes, baja o nula toxicidad, tamaños nanométricos, fotoluminiscencia sintonizable, estabilidad química y facilidad de funcionalización con biomoléculas. Además, su síntesis resulta altamente rentable [32] Gracias a estas ventajas, los CQDs presentan un amplio espectro de aplicaciones (**Figura 1.3.**) el cual se ha expandido rápidamente en los últimos años [33].

En el área de la electrónica, se han empleado en celdas fotovoltaicas [34], supercapacitores [35], celdas solares, donde actúan como de absorbentes de fotones. Al integrarse con algunos óxidos metálicos pueden liberar o almacenar electrones, generando así flujo eléctrico o calorífico [36]. En el campo de la química, los CQDs se han utilizado como fotocatalizadores

promoviendo la generación de pares electrón-hueco que inducen reacciones redox mediante radicales libres [37] o como sensores selectivos de metales pesados [35], [36].

En el ámbito biológico, destacan por su aplicación en la obtención de bioimágenes y la detección óptica de células específicas [8], [37]–[39]. Además, debido a su tamaño y estructura, han demostrado eficacia en la administración selectiva de fármacos [40], [41], entre otras aplicaciones emergentes [42], [43].

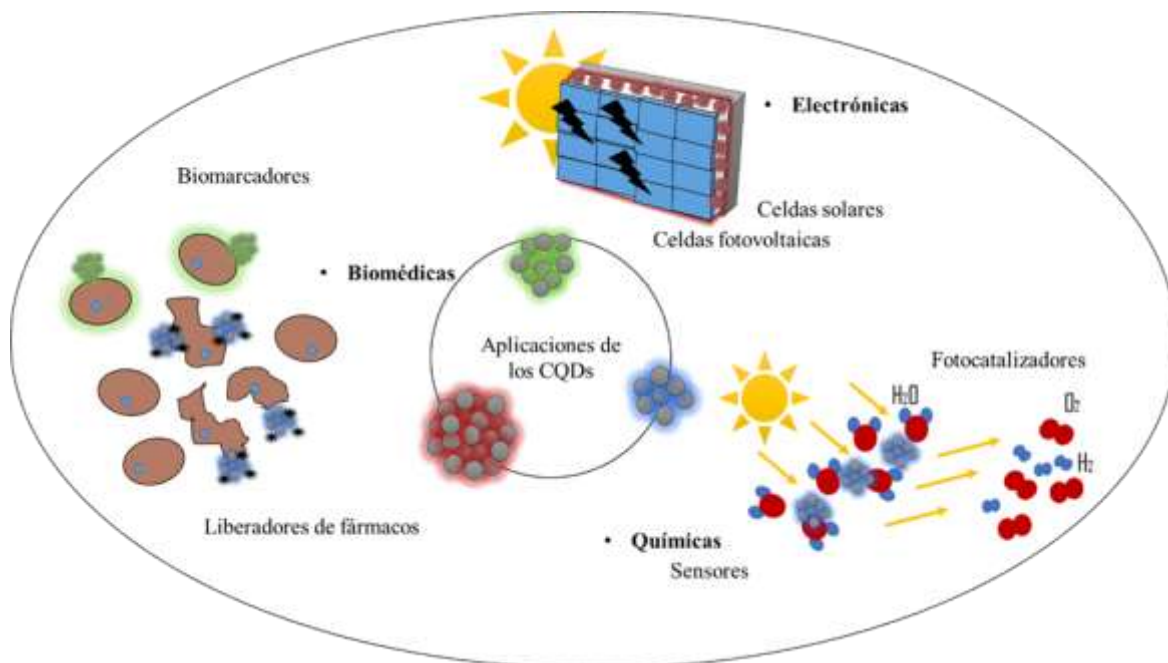


Figura 1. 3. Esquematización de las diferentes aplicaciones de los CQDs.

1.2. Propiedades

1.2.1. Composición y estructura

Existen diversos métodos para analizar y cuantificar la composición y estructura de los CQDs (**Figura 1.4.**). Entre las técnicas de rutina para el análisis químico se encuentran técnicas como espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier (FTIR), útil para identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de los CQDs, tales como grupos hidroxilo (OH), carbonilos (C=O), enlaces dobles aromáticos (C=C) y ésteres o éteres (C-O) [44], [45].

Otra técnica ampliamente utilizada es la espectroscopia de fotoelectrones por rayos X (XPS), la cual permite determinar la composición química porcentual, que varía según los precursores utilizados [46]. También proporciona información sobre los estados de

oxidación y los enlaces químicos presentes, principalmente en las regiones **C 1s** y **O 1s**², donde se observan señales características del carbono grafitico o amorfo (C-C / C=C), grupos hidroxilo, ésteres o éteres (C-O). carbonilos y carboxilos (C=O y O-C=O) [47], [48].

Para la caracterización estructural, se emplea espectroscopia Raman, la cual identifica bandas típicas del carbono: la banda De, asociadas a defectos y carbono amorfo, y la banda G relacionada con vibraciones C=C en estructuras gráficas. La relación entre estas bandas (I_D/I_G) se usa para estimar el grado de grafitización o nivel de defectos en los CQDs[49], [50].

Asimismo, la difracción de rayo X (DRX), permite analizar el ordenamiento atómico. Se pueden observar picos anchos entre los 20 y 25°, característicos de estructuras amorfas [51] o un pico entre los 26 y 30°, indicativo de la grafitización [52]. Finalmente, la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y de alta resolución (HRTEM) ofrece información sobre el tamaño de las partículas, que generalmente se encuentran entre 1 y 20 nm de diámetro. También se pueden observar espaciamiento interplanar de 0.19 a 0.22 nm, relacionados con estructuras gráficas o la presencia de grupos orgánicos [53].

²Las regiones **C 1s** y **O 1s** dentro de un XPS se refiere al pico correspondiente a los electrones emitidos por el nivel 1s (primer nivel, correspondiente al orbital s) del carbono y el oxígeno respectivamente al ser excitados por los rayos X.

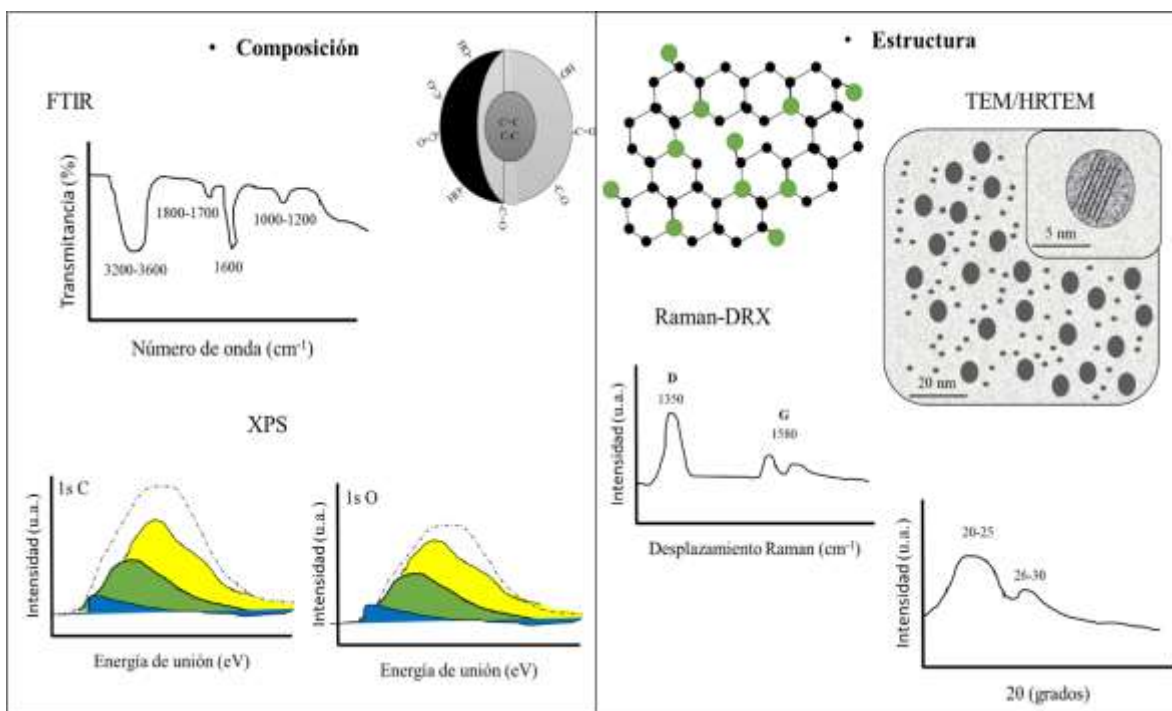


Figura 1. 4. Diferentes caracterizaciones realizadas a los CQDs para la determinación de sus propiedades de composición y estructural.

La composición y la estructura de los CQDs determinan sus propiedades ajustables, lo que los hace idóneos para una amplia gama de aplicaciones. En la literatura (**Tabla 1.1.**) se reportan estudios que demuestran cómo dichas propiedades dependen de diversos factores, entre ellos el tipo de precursor (como fuentes vegetales, extractos, jugos o materiales sólidos disueltos en un solvente), la ruta de síntesis empleada (hidrotermal, solvotermal, por microondas o ablación láser) y parámetros experimentales como la potencia, la temperatura, el tiempo de reacción y la concentración de precursores.

Tabla 1. 1. Comparación sobre el cambio de la composición y estructura en los CQDs según los precursores, métodos y condiciones de síntesis.

Precursor	Método de síntesis	Condiciones	Composición y estructura	Aplicación
Carbón negro [54]	Ablación láser	0.2 mg/mL, 2h a 147.4 J/cm ²	Partículas circulares de 1 a 7.5 nm con una estructura de grafito con defectos provocados por el oxígeno, con grupos	NA

			funcionales -CH, C=C, COOH y C-O	
grafito, ácido o-ftálico y o-fenilendiamina [55]	Electroquímica	60 V, 3 h	Partículas esféricas y cuasiesféricas de 2 nm con espacio reticular de 0.21 nm con grupos funcionales OH, C-H, C=O, C-N, C-O y sus respectivos elementos externos	Anti falsificación
Quitosano [56]	Microondas	1 mg/mL, 750 W y 40 minutos	Partículas esféricas de 1 a 3 nm con estructuras desordenadas con hibridaciones sp^3 y sp^2 con grupos funcionales OH, N-H, C=O, C=C, C-N y C-O	Detección de iones Al^{3+} y Sondas fluorescentes
Cáscara de avellana [57]	Pirólisis	200 °C y 20 min	Partículas esféricas de 2 a 10 nm con grupos funcionales OH, -NH, C-H, C=O, C=C, C-O-C, C-N y C-O	Detección sensible de aflatoxina B1 (AFB1)
Hojas de limón [58]	Microondas	1 g/mL, 500 W y 20 minutos	Partículas esféricas de 1.5 a 8 nm con altos niveles de defectos estructurales con grupos funcionales OH, -CH, C=C, y C-O	Detección de tetraciclina en agua
<i>Angiopteris evecta</i> [59]	Hidrotermal	0.28 g/mL, 250 °C y 8 h	Partículas esférica de 2 a 4 nm con grupos funcionales OH, C-H, C=C, y C-O	Detección de iones Fe^{3+}
DTPA y EDA [60]	Electroquímico	10 V y 2 h	Partículas esféricas de 1 nm con estructura altamente desordenada y grupos funcionales OH, C-H, C=O y C=C	Detección de clortetraciclina
Láminas de grafito [61]	Ablación laser	2.5 mg/mL, 1J	Partículas esféricas de 3.5 a 5 nm con grupos funcionales C-C, C=C, OH, C-N, $C\equiv N$ y C=O	Detección de iones Fe^{3+}

Ácido cítrico [62]	Microondas	1 g/mL y 8 minutos alta potencia	Partículas esféricas de 1.5 a 4.5 nm, con espaciamento reticular de 0.35 nm, con estructura laminar bien ordenada con grupos funcionales OH, C-H, C=O, C-O	Fotodinámicas antimicrobianas
Cáscara de papa [63]	Hidrotermal	0.05 g/mL, 200 °C y 6 h	Partículas esféricas de 9 nm con estructura grafítica con grupos funcionales C-O, C-H, OH, C=O	Relleno funcional de envasado
Caparazón de tortuga [64]	Carbonizado	10 g, 500 °C y 5 h	Partículas esféricas de 2.5 nm con un grado de grafitización de 0.96 con grupos funcionales OH, C=O, C=C, N-H y C-N	Seguridad (Falsificación)
Isopropanol [65]	Microplasma	4kV y 20 min	Partículas esféricas de 2 nm con estructura amorfa con hibridaciones sp^2 y sp^3 con grupos funcionales OH, C-H, C=O, C=C, C-O-C	NA
Ácido cítrico [66]	Microondas	750 W 8 min	Partículas esféricas de 10 nm con estructura tipo grafito y grupos funcionales C=C, C-N, C-O, C=N y C=O	Fotovoltaicas
Varilla de grafito [67]	Electroquímica	1.5 V y 4 h	Partículas esféricas de 2 a 18 nm con espacio reticular de 0.2 nm con grupos funcionales N-H, OH, C-H, C=O, C=C, C-O-C y C-N	NA
Jugo de tomate [68]	Hidrotermal	10 mL, 150 °C y 2 h	Partículas esféricas de 3 nm con estructura grafítica con grupos funcionales como OH,	Cuantificación de antígeno carcinoembrionario

			N-H, C-H, C=C, C=O y C-O	
--	--	--	-----------------------------	--

1.2.2. Propiedades ópticas

Entre las propiedades más destacadas de los CQDs, se encuentran las ópticas, como su fuerte absorción en el rango ultravioleta- visible y su alta fotoluminiscencia, regulada por diversos mecanismos de emisión [69]. El entendimiento de estas propiedades es crucial para el desarrollar nuevas tecnologías basadas en la manipulación de la luz a escala nanométrica. Existen múltiples técnicas para evaluar estas propiedades, descritas a continuación.

1.2.2.1. Propiedades de absorbancia

La técnica más común para analizar las propiedades ópticas es la espectroscopia ultravioleta- visible (UV-Vis), la cual permite determinar absorbancia en función de la estructura electrónica y su interacción con la luz [70]. Estas propiedades están determinadas por:

a) Transiciones electrónicas

Los puntos cuánticos de carbono (CQDs) presentan picos de absorción que se extienden desde la región ultravioleta hasta el visible del espectro electromagnético (**Figura 1.5.**). Estas absorciones se originan por transiciones electrónicas asociadas a la estructura interna del material. La banda principal aparece en la región UV (230–280 nm) y corresponde a transiciones $\pi-\pi^*$ de los electrones en los enlaces conjugados C=C presentes en las estructuras gráficas o aromáticas [71], [72]. Una segunda banda, menos intensa, puede observarse entre 300 y 450 nm, atribuida a transiciones $n-\pi^*$ o a estados defectuosos relacionados con electrones no enlazantes de grupos funcionales como C=O o C–N [73], [74].

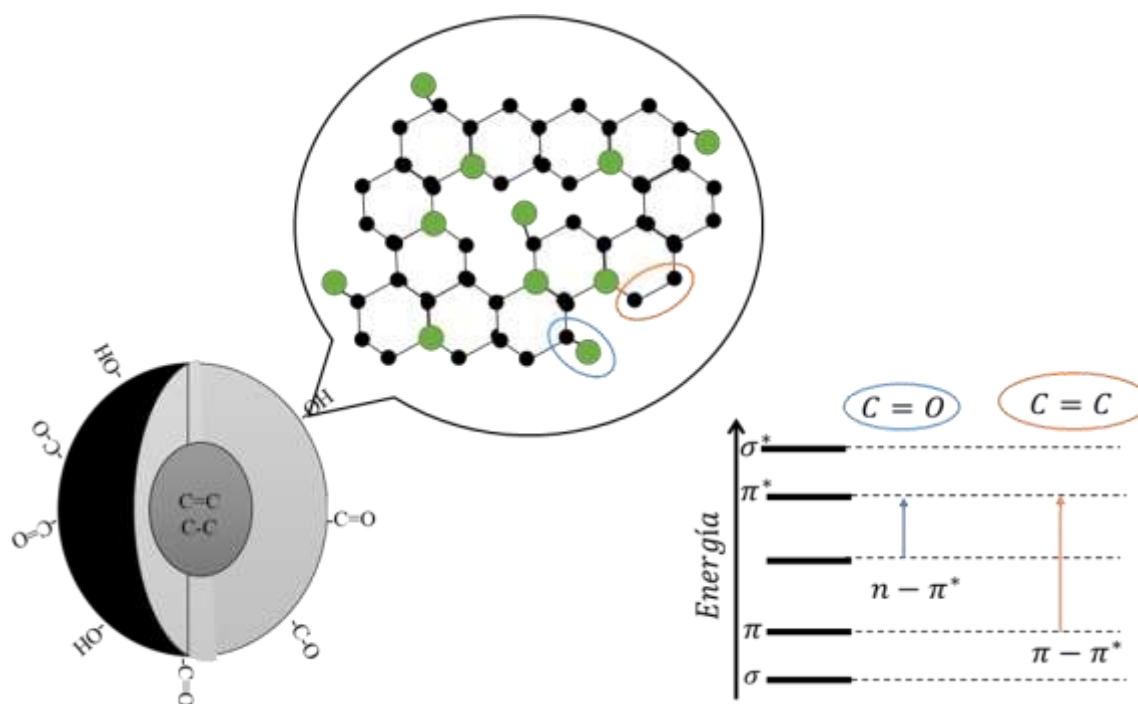


Figura 1. 5. Transiciones electrónicas provocadas en los CQDs.

b) Efecto del confinamiento cuántico

El tamaño de los CQDs influye directamente en su absorbancia, ya que existe una dependencia con el tamaño y el ancho de banda prohibida (E_g) [75], provocando con la disminución de tamaño de partícula el E_g aumenta generando un desplazamiento hacia el azul en el espectro de absorción [75], al disminuir el tamaño de partícula, E_g aumenta, generando un desplazamiento hacia el azul del espectro de absorción (**Figura 1.6.**) [76]. Sin embargo, no todos los CQDs presentan esta dependencia, ya que algunos contienen núcleos amorfos o defectos superficiales que modifican estos valores [77] creando estados metaestables o trampas energéticas.

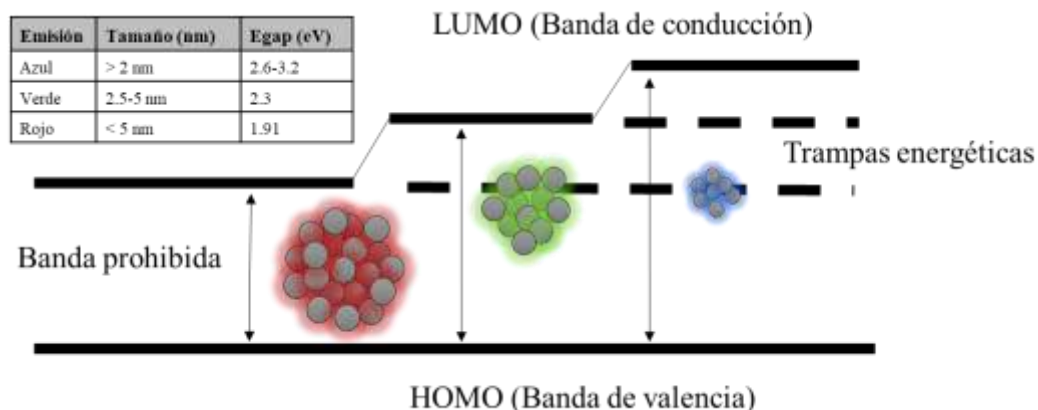


Figura 1. 6. Cambio del Eg en relación del tamaño y emisión de los CQDs.

1.2.2.2. Propiedades de fotoluminiscencia

La fotoluminiscencia (FL) de los CQDs es una de las características más atractivas. Se destaca por su ajuste fotónico (phototuning) [78], la eficiencia cuántica o rendimiento cuántico (Quantum Yield “QY”) [79], susceptibilidad al quenching [80] y los mecanismos que la generan [81].

a) Fotomodulación (Phototuning)

Este fenómeno describe la emisión multicolor dependiente de la longitud de onda de excitación [72]. Los CQDs pueden cambiar el color al variar la longitud de onda excitación, lo cual se atribuye a la presencia de múltiples estados electrónicos (**Figura 1.7.**). Factores como la distribución del tamaño, los defectos superficiales, los dopantes y el tipo de disolventes afectan este comportamiento [82].

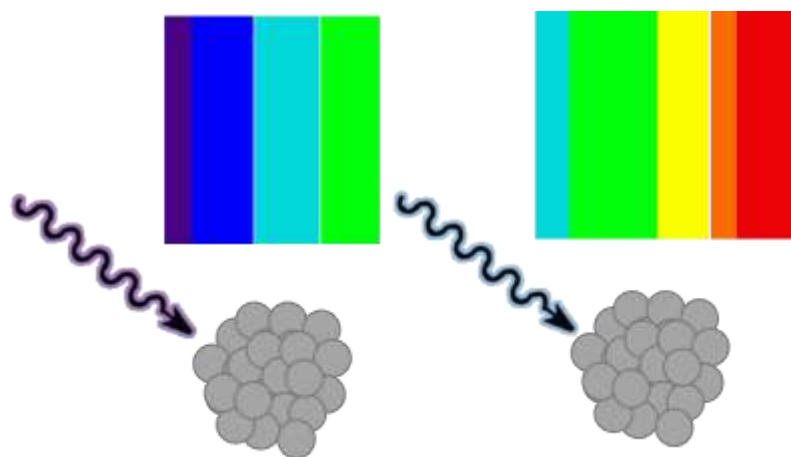


Figura 1. 7. Dependencia de la longitud de onda de excitación en la emisión de los CQDs.

Esta propiedad en los CQDs depende de muchos factores como la distribución de tamaños, donde el rango del diámetro de la partícula de carbono genera diferentes niveles de confinamiento [83], los estados de superficie provocando por defectos o grupos funcionales en la superficie que puede crear estados electrónicos adicionales [84], las impurezas o dopajes estos pueden introducir nuevos niveles electrónicos en la banda prohibida [85] y los solventes utilizados en los CQDs que pueden cambiar el índice de refracción y la polaridad del medio contribuyendo al cambio de la excitación y emisión [86]. En la literatura (**Tabla 1.2.**) existen diferentes reportes de CQDs con fotomodulación muy amplios abarcando todo el espectro visible o muy estrecho con la emisión en un solo color

Tabla 1. 2. Comparación en las propiedades de phototuning de los CQDs reportados.

Precursor	Método de síntesis	Factor	Excitación (nm)	Máximo de excitación (nm)	Máximo de emisión (nm)
L-triptófano con ácido cítrico, 4-aminobenceno con etilendiamina y o-fenilendiamina [87]	Hidrotermal	Dopantes de Cu, Ag y Zn	300 a 420	400, 300 y 400	509, 443 y 554
Ácido cítrico y Glutación [88]	Solvotermal	Dopaje con Pr	350 a 480	400	575
o-fenilendiamina [89]	Solvotermal	Cambio de solvente en la reacción, ácido cítrico con agua, agua, etanol y agua con ácido sulfúrico	NR	360	450, 540, 570 y 630

Lignina [90]	hidrotermal	Cambio de solvente después de la reacción con ácido benzoico, ácido 2-aminobencenosulfónico, ácido 2,4-diaminobencenosulfónico y diclorhidrato de 1,2,4-triaminobenceno provoca un efecto cuántico	400 a 600	325, 350, 450 y 490	400, 475, 520 y 610
1,3-diamino-2-propanol y ácido cítrico [91]	Hidrotermal	Cambio de medio, aumento de la concentración de precursores	300 a 500	350, 370, 380, 510, 520, 520 y 550	453, 457, 463, 541, 542, 546, 550 y 574
Lignina y polivinilpirrolidona [92]	Hidrotermal	Dopaje con grupos nitrogenado con etilendiamina, o-fenilendiamina y Mile Blue	NR	480, 515, 545 y 635	500, 520, 550 y 620
Tirosina, di-n-butilamina, etilendiamina y o-fenilendiamina [93]	Hidrotermal	Estados de superficie	360 a 530	400, 430, 490 y 560	475, 530, 580, y 645
M-fenilendiamina, O-fenilendiamina, P-fenilendiamina [94]	Solvotermal	Cambio del arreglo estructural en las moléculas precursoras (Orto, Meta, Para)	320 a 420, 360 a 480 y 420 a 580	360, 380 y 500	450 y 550 y 610
Bagazo de caña de azúcar [95]	Hidrotermal	Confinamiento cuántico, mayor área superficial y trampas emisivas	300-440	360	480
ácido ascórbico y 1,3,5-trihidroxibenceno [96]	Deshidratación térmica	Efecto de confinamiento cuántico con respecto al tamaño de partícula	NR	NR	492-574
Espuma residual [97]	Hidrotermal	Dopaje con elementos como Ca, Ag, Al, Cu, Fe, K, Li, Mg, Na Pb, Zn y Cr	370 a 570	385, 405, 440, 450 y 500	475, 483, 538, 569 y 589
Ácido cítrico y propilendiamina [98]	Hidrotermal	Grupos superficiales	NR	365, 430, 515 n	470, 500 y 550

b) Rendimiento Cuántico

El rendimiento cuántico o en inglés quantum yield (QY) representado por la letra griega ϕ , es la relación que existe entre un número de partículas que presentan una señal de luminiscencia con respecto al número total de moléculas que son excitadas. Es un parámetro fundamental en la evaluación de la eficiencia óptica en las partículas luminiscentes [99]. Se puede medir mediante la ecuación (**ecuación 1.1.**), estableciendo la relación entre los fotones emitidos con respecto a los fotones absorbidos mediante el proceso de luminiscencia.

$$\phi = \frac{\text{fotones emitidos}}{\text{fotones absorbidos}} \dots (\text{Ecuación 1. 1})$$

Para un compuesto altamente luminiscente el valor del QY se aproxima a la unidad o al 100 %, mientras que los compuestos que no presentan fluorescencia el valor del QY tiende a cero [100]. Para la determinación de QY existen dos métodos:

- I. *Método relativo.* Este se basa en la comparación con un fluoróforo estándar [101]. En el caso de los CQDs, el estándar más comúnmente utilizado es el sulfato de quinina [102] ya que presenta una longitud de onda de excitación de 350 nm,. Sin embargo, cuando los CQDs son modificados, dicha longitud de onda puede cambiar (Tabla 1.3), lo que obliga a emplear otro fluoróforo de otra referencia más adecuado. Este método es ampliamente utilizado debido a su de bajo costo y simplicidad, no obstante, presenta ciertas desventajas, como la posibilidad de que errores significativos si no se cumplen adecuadamente las condiciones experimentales necesarias, control en las variables de absorbancia o alineación del sistema óptico para la comparación [103].

Tabla 1. 3. Comparación en grupos fluoróforos para la determinación de QY.

Fluoróforo	QY (%)	Solvente común	Excitación (nm)	Emisión (nm)	Notas útiles
Sulfato de quinina	~54	Ácido Sulfúrico 0.1 M	350	450	CQDs azules
Fluoresceína	~95	Etanol / NaOH	490	515	Sensible al pH
Rhodamina 6G	~96	Etanol	525	550	CQDs verdes
Rhodamina B	~31	Agua / Etanol	540	625	CQD rojos

Coumarina 153	~38	Etanol	430	500	CQDs UV-azul
9-10-Difenilantraceno	~90	Ciclodexano	360	420	Medios no polares

- I. *Método absoluto.* Este método permite la medición directa de la relación entre los fotones absorbidos y emitidos, sin necesidad de emplear un estándar, lo que ofrece una mayor precisión. Su principal desventaja radica en el elevado costo [104] debido al uso de una esfera integradora acoplada a un sistema espectroscópico.

El QY en los CQDs está influenciado por diversos factores estructurales e incluso por las condiciones del medio de dispersión [105]. En cuanto a la superficie, pueden presentarse defectos superficiales que actúan como trampas no radiativas, provocando el apagado de la fluorescencia (quenching) [46]. Por otro lado, la incorporación de ligandos orgánicos o grupos funcionales puede incrementar el rendimiento cuántico [106].

En lo referente a la estructura, el tamaño de partículas es determinante: a menor tamaño, mayor es el confinamiento cuántico, lo que se traduce un mayor QY. Asimismo, la cristalinidad, asociada a la presencia de dominios gráficos o aromáticos, puede influir de forma significativa, mientras que la incorporación de heteroátomos o el dopaje, también se ha reportado superficiales como estrategias para mejorar el QY [107].

Respecto del medio de dispersión, factores como el pH, el tipo de disolvente [108] e incluso la temperatura pueden modificar a la fluorescencia [109]. En la literatura se reportan CQDs con una amplia gama de valores QY, lo que repercute directamente en el desempeño de estas nanopartículas en sus aplicaciones (**Tabla 1.4.**) se presentan diversos estudios donde se reportan modificaciones al rendimiento cuántico de fluorescencia de puntos cuánticos de carbono, destacando el precursor, el método de síntesis, el factor que influye en el QY, el valor obtenido y su aplicación.

Tabla 1. 4. Comparación en la modificación del QY y sus factores.

Precursor	Método de síntesis	Factor	QY (%)	Aplicación
-----------	--------------------	--------	--------	------------

3-amino fenilborónico [110]	Hidrotermal	Dopaje con heteroátomos de Boro y Nitrógeno	51.4	Detección de Peróxido de hidrógeno y ácido ascórbico en alimentos
Benzamida, dibenzoilmetano, 1,8-naftalimida y anhídrido 1,4,5,8-naftaleno tetracarboxílico [111]	Calentamiento con aluminio	Tamaño y estructuras conjugadas por anillos aromáticos	81.13	Seguridad de información, falsificación
Urea y ácido cítrico [112]	Solvotermal	Grado de carbonización en la estructura	94	Películas bloqueadoras de luz azul
Ácido perileno-3,9-dicarboxílico, urea y ácido bórico [113]	Condensación cruzada	Uso de solvente y estructura por dominios sp ²	94 (agua), 69 (DMF)	Láser e iluminación
Ácido cítrico, 4-bromo-1,2-diaminobenceno [114]	Microondas	Cambio de solvente: agua, formaldehído, DMF y etanol. Crea defectos superficiales	35.5, 87.5, 41 y 72	Aplicaciones fotovoltaicas
Ácido cítrico monohidratado, ácido cítrico anhidro, ácido oxálico anhidro, ácido láctico, ácido málico, ácido tartárico [115]	Hidrotermal	Estados de superficie al contenido de grupos con O	52-58	No reportado
Ácido ascórbico [116]	Hidrotermal	Estados de superficie y tamaños homogéneos	35	Quimiodetección de ácido úrico
PET [117]	Microondas asistida por hidrotermal	Estructura gráfica	97.3	Detección de iones Fe ³⁺ y tintas de seguridad
Ácido cítrico y urea [118]	Microondas	Pasivación de compuestos de la urea en la superficie	75	Detección de iones metálicos

Ácido transaconítico, dietilentriamina [119]	Hidrotermal	Diversos grupos funcionales en la superficie y la distribución de tamaño por el cambio de pH	77	Detección de iones metálicos
Ácido cítrico, etanolamina [120]	Pirólisis asistida por microondas	Relación entre soluto y solvente por sistemas conjugados	14.19 hasta 90.59	fotosíntesis en plantas
Metotrexato [121]	Hidrotermal	Temperatura de pirólisis (estructura) y pH	87.3	Detección y tratamiento de cáncer
Polietilenimina ramificada y sal sódica de rosa de Bengala [122]	Hidrotermal	Los estados superficiales debido a la inconsistencia de tamaño	90	Imágenes de lisosomas
p-dihidroxibenceno y etilendiamina [123]	Hidrotermal	Dopaje con N, reduciendo los C=O, estructura de monocapa como el grafeno	39.3	Detección de iones metálicos

c) Quenching

El término quenching hace referencia a la disminución o apagamiento de la fotoluminiscencia en partículas fluorescentes, como los CQDs, cuando interactúan con sustancias o bajo ciertas condiciones [124]. En estos sistemas, el fenómeno ocurre cuando los electrones excitados, que en condiciones normales emiten luz al relajarse, transfieren su energía a otras especies o la disipan mediante procesos no radiativos, lo que provoca una reducción o pérdida significativa de la emisión lumínica [125]. **(Figura 1.8)**

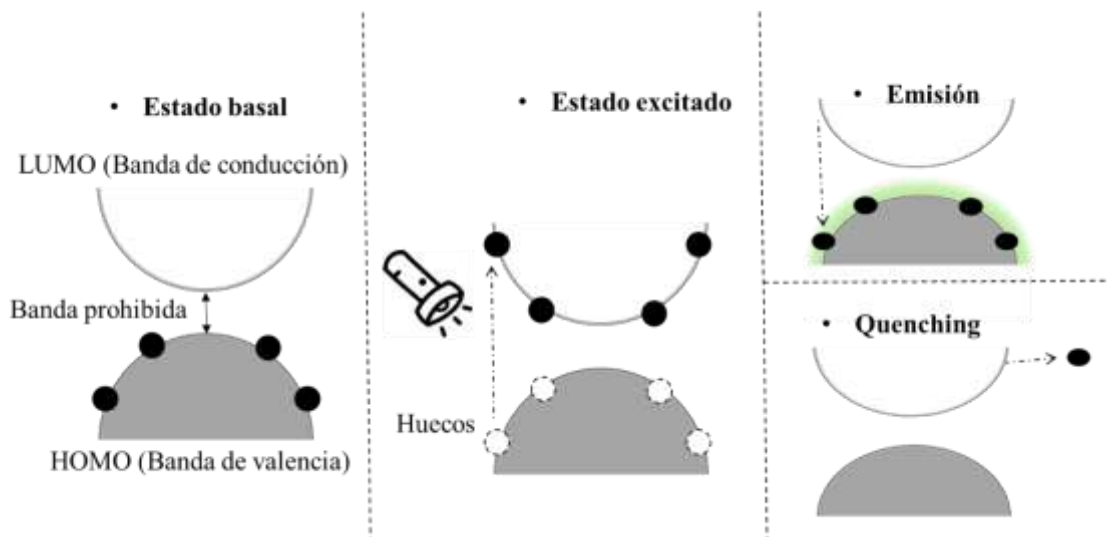


Figura 1. 8. Efecto de quenching en lo CQDs.

El quenching es un fenómeno de gran relevancia en el estudio de los CQDs, ya que proporciona información valiosa sobre la interacción entre las nanopartículas y su entorno [46] Este comportamiento es fundamental para diversas aplicaciones, incluyendo sensores, bioimagen y dispositivos optoelectrónicos.

En los CQDs se han identificado principalmente cuatro mecanismos de quenching (**Figura 1.9.**):

- I. *Dinámico (Colisional):* Se produce cuando, en el estado excitado, los CQDs colisionan con una molécula supresora (quencher), provocando la pérdida de energía por procesos de transferencia no radiativa.
- II. *Estático:* Implica la formación de un complejo estable entre el CQDs y quencher antes de la excitación, lo que inhibe la emisión de luz.
- III. *Transferencia de energía:* Cuando un flujo de electrones o energía desde el CQDs hacia la molécula quencher.

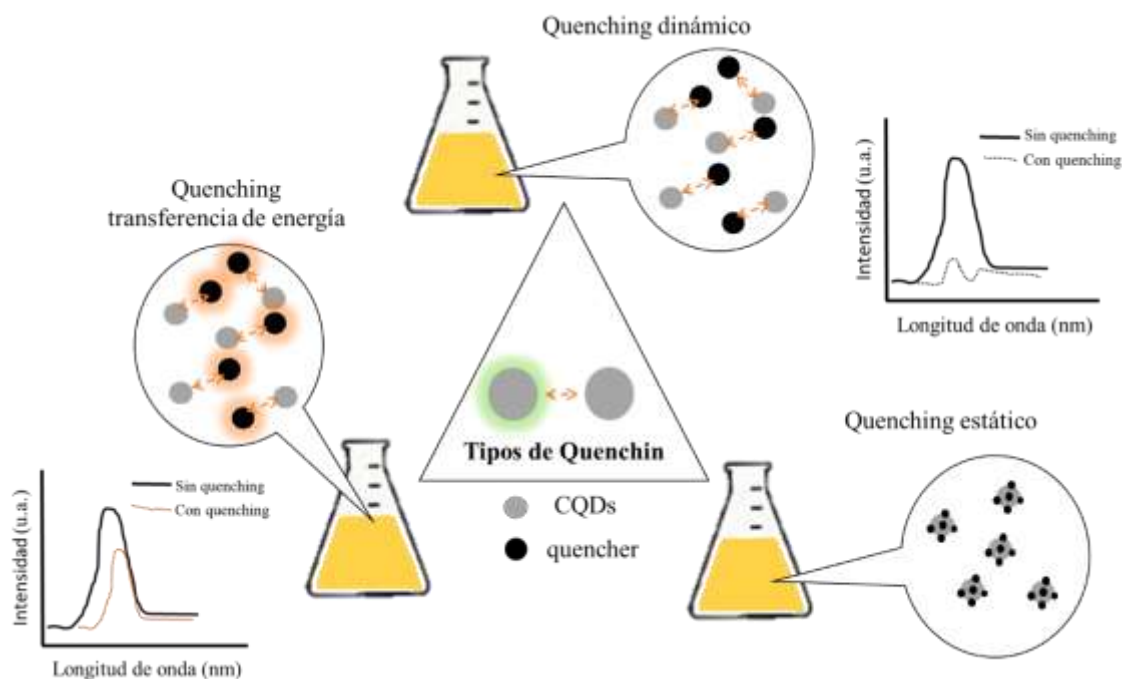


Figura 1. 9. Diferentes tipos de quenching en partículas luminiscentes.

d) Mecanismos de luminiscencia

El origen de la fluorescencia en los CQDs sigue siendo un tema de debate, debido a la gran variedad de estructuras y composiciones reportadas en la literatura [73], [74]. Entre los mecanismos de luminiscencia más aceptados se encuentran: el estado de superficie [126], [127], el efecto de confinamiento cuántico [128], [129] y fluorescencia molecular [130]. Estos procesos pueden verse influenciados significativamente por variaciones en el pH y por las rutas de síntesis utilizadas, lo que añade complejidad a la elucidación del fenómeno de fluorescencia.

- I. *Efecto del confinamiento cuántico:* Este mecanismo de fluorescencia se atribuye a las transiciones a través de banda prohibida (E_g) que surgen en los dominios π conjugados. Dichas transiciones electrónicas presentan una intensa absorción en la región ultravioleta [131] y emisiones en el rango visible, cuya longitud de onda varía en función de las características estructurales del material.. Se considera que esta fuerte absorción se debe a la excitación de electrones π en hibridaciones sp^2 o sp^3 , las cuales generan estados excitónicos (pares electrones y huecos) (**Figura 1.10.**),

Durante la migración de estos excitones hacia trampas de energía, se produce la relajación radiativa a diferentes longitudes de onda, lo que origina la emisión [75]. Algunos autores sostienen que las propiedades ópticas de los CQDs se derivan principalmente de los enlaces sp^2 y sp^3 , los cuales tienen sitios π [132]. Así que la fluorescencia se genera por la recombinación de pares de electrones y huecos en los niveles electrónicos π y π^* , situados entre la banda prohibida de los estados σ y σ^* produciendo emisiones intensas en el rango visible [131].

En este contexto, la longitud de onda de emisión depende tanto del ancho de banda prohibida (E_g) como del tamaño de partícula [75]. Sin embargo, este modelo presenta limitaciones, ya que el confinamiento cuántico se considera válido únicamente cuando el tamaño de las partículas es inferior al radio del excitón de Bohr [133].

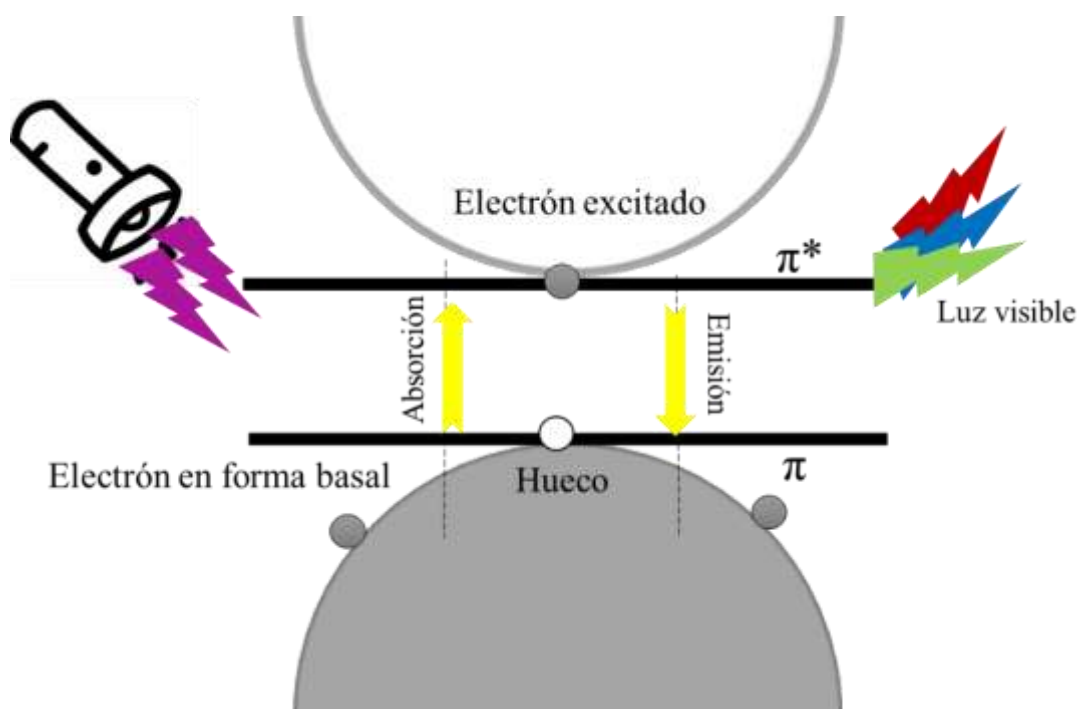


Figura 1. 10. Mecanismo de luminiscencia por efecto del confinamiento cuántico en los CQDs.

- II. *Estado de superficie:* Este mecanismo se relaciona con defectos estructurales presentes en la superficie. Dichas imperfecciones, originadas dominios sp^2 y sp^3 no perfectamente ordenados, generan trampas de energía superficial (**Figura 1.11.**) y actúan como centros emisores que, de manera similar a moléculas aromáticas pueden

producir exhiben emisiones multicolores [77][56]. Asimismo, se han reportado estados electrónicos asociados a grupos carbonilos [134], con propiedades de excitación y emisión diferenciadas.

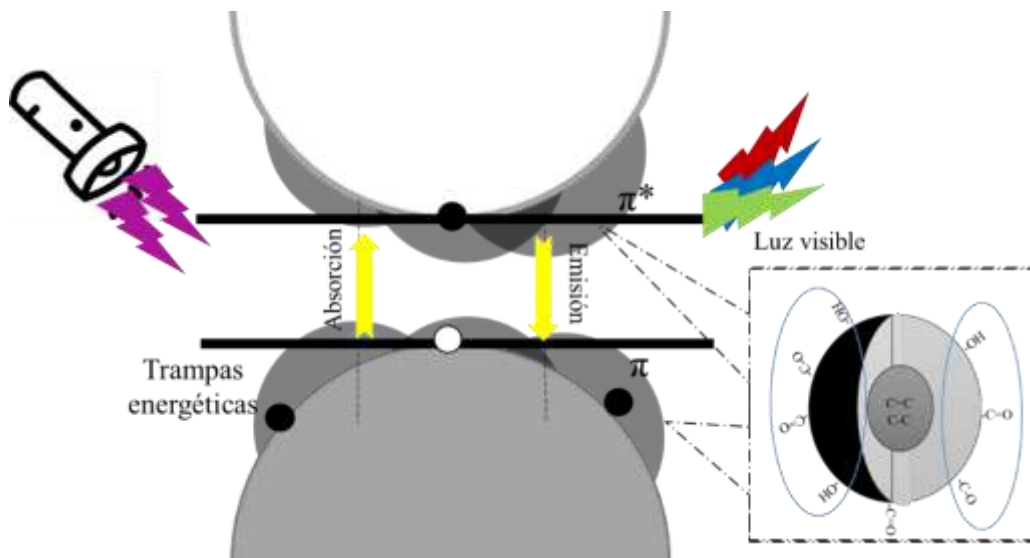


Figura 1. 11. Mecanismo de luminiscencia por efecto del estado de superficie en los CQDs.

- III. *Fluorescencia molecular o tuneada:* En general los CQDs presentan rendimientos cuánticos bajos debido a la presencia de defectos superficiales inestables. Este problema puede resolverse mediante la pasivación de la superficie o funcionalizados con diferentes átomos, iones, moléculas o macromoléculas [14] (**Figura 1.12.**), lo que reduce los defectos y aumenta o incluso iguala la intensidad de emisión [135]. Sin embargo, este mecanismo de emisión se utiliza con menor frecuencia, ya que puede inducir el efecto de quenching [136].

Algunos autores atribuyen la fluorescencia a la recombinación radiativa de excitones a través de trampas inestables. No obstante, este proceso ofrece una ventaja adicional: la posibilidad de seleccionar longitudes de onda de emisión en función de diferentes longitudes de excitación [131].

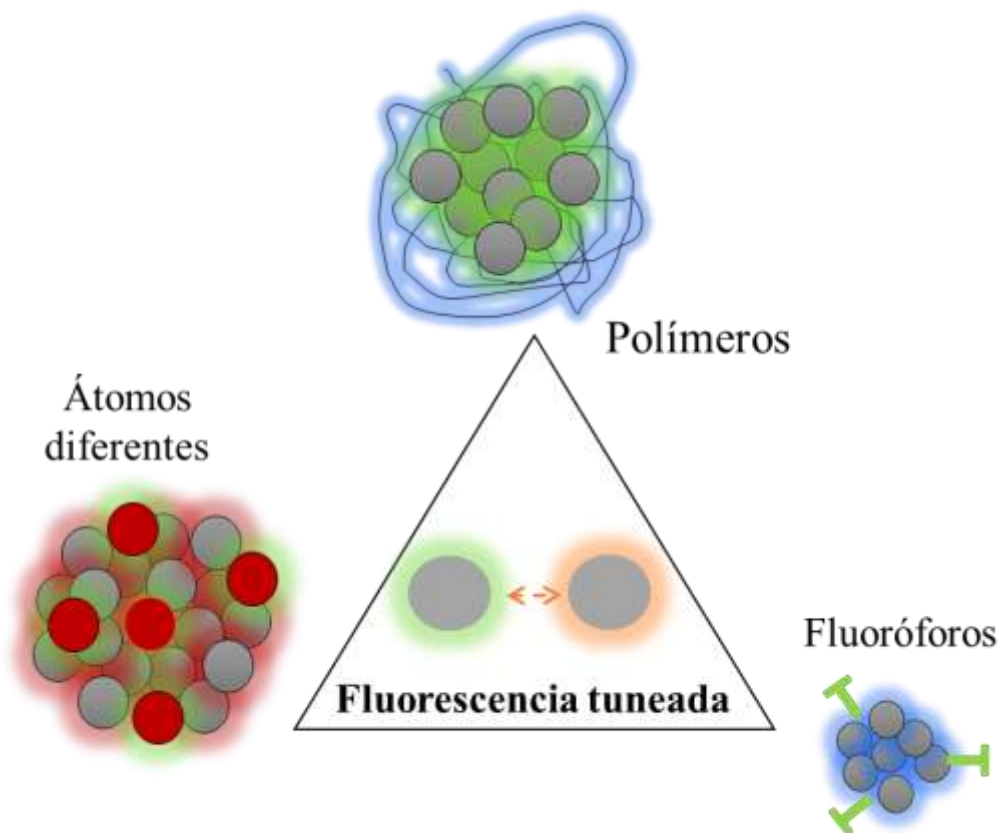


Figura 1. 12. Mecanismo de luminiscencia por efecto de una fluorescencia molecular o tuneada en los CQDs.

Los CQDs fueron sintetizados por primera vez en 2004 por Xu y su grupo de trabajo, mientras intentaban purificar nanotubos de carbono de pared simple [137], [138]. Desde entonces se han desarrollado difernes rutas de síntesis orientada a obtener partículas con tamaños y grupos funcionales superficiales controlados, a fin de ajustar sus propiedades para las aplicaciones específicas[139].

Los métodos de síntesis (**Figura 1.13.**) se clasifican en dos enfoques principales de arriba hacia abajo (Top-down) y de abajo hacia arriba (Bottom-up) [140].

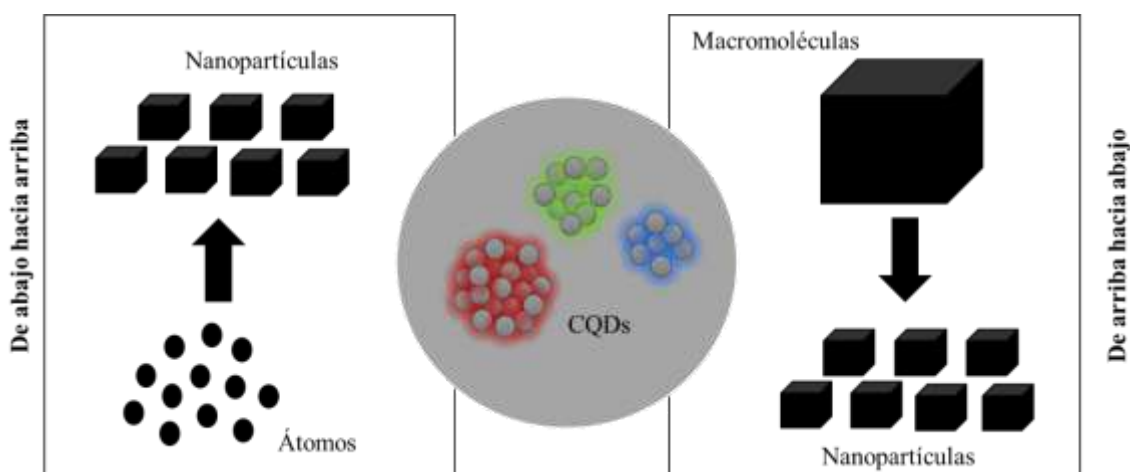


Figura 1. 13. Rutas de síntesis de los CQDs.

Los métodos descendentes (*top-down*) consisten en descomponer estructuras macroscópicas de carbono en partículas más pequeñas, como los CQDs [133]. Estas rutas suelen requerir altas cantidades de energía y el control en las condiciones de reacción puede representar un desafío [141]. Además, los costos asociados al equipo son superiores en comparación con otras técnicas [142]. No obstante, su principal ventaja radica en la escalabilidad, ya que, una vez optimizadas las variables del proceso, permiten la producción a grande escala [143]. Entre las técnicas representativa se encuentran descarga de arco [144], oxidación química [145], pirolisis y ablación laser [146] empleando como precursores postes de cera de grafito, estructuras de grafito, adhesivos compuestos, restos carbonizados y humo negro u hollín [140].

Por su parte, los métodos ascendentes (*bottom-up*) se basan en la descomposición de precursores orgánicos en pequeñas moléculas orgánicas, cluster o polímeros [147] los cuales posteriormente se reorganizan para formar CQDs [13]. Este enfoque permite un mayor control de tamaño, la forma y la estabilidad de las propiedades ópticas y estructurales, además de ser más rentables operativamente [148] y amigables con el medio ambiente [149].

Entre las técnicas más empleadas se incluyen la pirolisis [150], síntesis asistida por microondas [151] y los métodos solvotermales o hidrotermales [152], que utilizan diferentes precursores renovables como frutas, verduras o derivados que carbonosos [153].

La selección de la ruta de síntesis óptima depende de una evaluación comparativa de principales ventajas y desventajas, considerando factores como el enfoque metodológico, los costos, tipo de equipamiento requerido, el control de tamaño y morfología, la facilidad de funcionalización, la sostenibilidad y la reproducibilidad (**Tabla 1.5.**). Se presenta un resumen de estas características para facilitar la selección según el contexto de aplicación.

Tabla 1. 5. Comparativa entre los métodos de síntesis de CQDs considerando los principales aspectos durante su obtención.

Aspecto	De abajo hacia arriba	De arriba hacia abajo
Enfoque	Construcción desde moléculas pequeñas o biomasa	Fragmentación de materiales de carbono más grandes
Costo	Bajo	Moderado o alto
Equipamiento	Sencillos (hornos, autoclaves, microondas)	Más complejo (láser, ultrasonido, electroquímica, oxidación ácida)
Tamaño y forma	Más control sobre tamaño y morfología	Menos uniformes, difícil control sin procesamiento adicional
Funcionalización	Más fácil y directa durante la síntesis	Requiere pasos posteriores para modificar la superficie
Sostenibilidad	Alta (uso de precursores naturales, menor toxicidad)	Baja (uso de reactivos agresivos o procesos de alta energía)
Reproducibilidad	Puede variar según el precursor (especialmente si es natural)	Alta si se controlan bien las condiciones del proceso

1.3.1. Síntesis hidrotermal

La síntesis hidrotermal es uno de los métodos más utilizados para la obtención CQDs debido a su versatilidad, simplicidad operativa, escalabilidad y carácter ambientalmente amigable [154]. Este procedimiento consiste en la reacción de precursores orgánicos en un medio acuoso (o en solventes diferentes al agua, caso en el cual se denomina solvotermal) dentro de un reactor sellado, sometido a condiciones controladas de temperatura y presión [155].

El proceso se inicia con la carbonización de las moléculas solubles en agua, que sufren transformaciones químicas como hidrólisis, deshidratación y descarboxilación [156]. Posteriormente, las submoléculas generadas experimentan nucleación por polimerización y aromatización [157], seguida de un reordenamiento estructural que da lugar a clústeres

aromáticos [158]. En condiciones de sobresaturación, estos núcleos se reorganizan para formación CQDs [159] obteniéndose partículas de tamaños uniforme, buena dispersión y mínima aglomeración.

Esta reacción que ocurre en fase líquida, permite un control preciso de variables como presión, atmosfera interna y composición del medio, lo que se traduce en materiales de alta pureza y propiedades controladas [160] (**Figura 1.14.**).

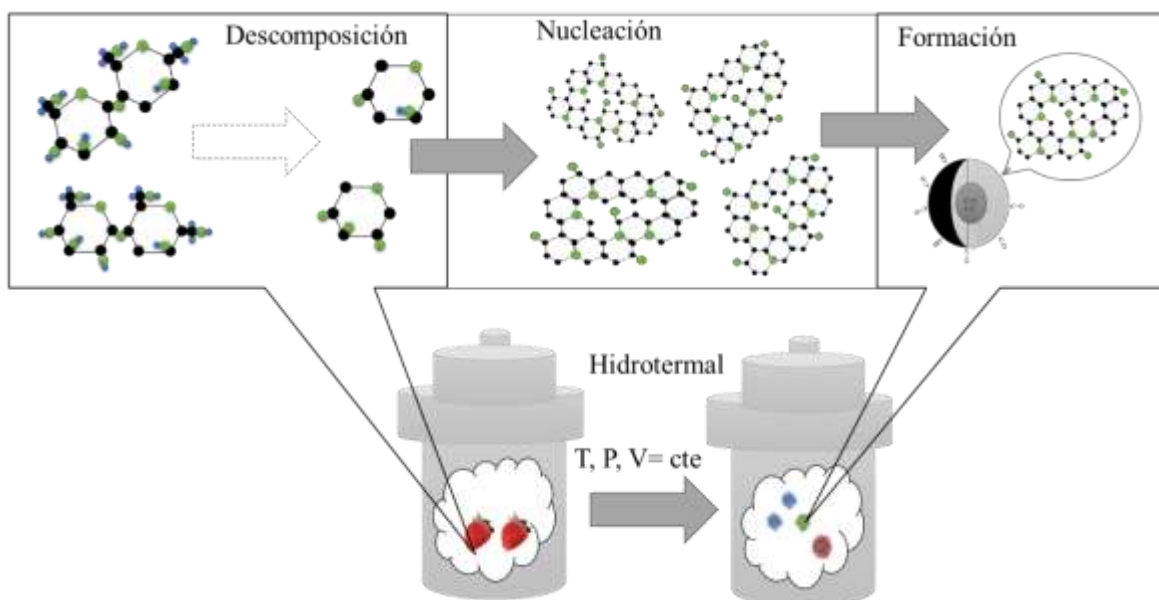


Figura 1. 14. Proceso de formación general de los CQDs.

Un aspecto relevante del proceso es que los grupos funcionales presentes en la biomasa o fuentes vegetales, como carboxilos e hidroxilos, se conservan en la estructura y superficie de los CQDs [161]. Lo que facilita su posterior funcionalización. Asimismo, los heteroátomos presentes (comúnmente nitrógeno, azufre o fósforo [162]) pueden incorporarse de manera intrínseca a la estructura de los CQDs, durante el proceso de síntesis mejorando las propiedades ópticas, electrónicas y químicas [163].

Sin embargo, el método hidrotérmal presenta desventajas técnicas, principalmente asociadas a la comprensión de los mecanismos de reacción [164] . Parámetros como la temperatura, el tiempo de reacción, la concentración de precursores y la naturaleza del disolvente influyen de manera significativa en la formación, tamaño, morfología, grado de carbonización y

composición superficial en los CQDs [165]. La optimización de estas variables resulta esencial para diseñar CQDS con propiedades específicas y reproducibles.

1.3.1.1. Precursores

Los precursores utilizados en la síntesis hidrotermal juegan un papel clave en la determinación de sus propiedades, ya que no solo aportan los átomos de carbono para la formación, sino que también influyen en la estructura y superficie, así como en sus propiedades de luminiscencia [166]. En general, pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- I. *Moléculas orgánicas purificadas*: Se emplean por su estructura definida y solubilidad en medios específicos, lo que facilita las condiciones de reacción y permite obtener de CQDs con propiedades más estables y reproducibles [167]. No obstante, su principal desventaja radica en el elevado y que en su purificación u obtención puede implicar procesos químicos poco amigables con el medio ambiente [168].
- II. *Materiales de origen natural o residuos orgánicos*: Resultan atractivos por sus bajo costo, alta disponibilidad, sostenibilidad y la capacidad de proporcionar múltiples funcionalidades químicas [169]. Además suelen contener heteroátomos que favorecen la modificación estructural in situ durante la síntesis hidrotermal sin requerir agentes externos ni etapas adicionales [170].

La elección del precursor influye directamente en las propiedades clave como el rendimiento cuántico (QY), morfología y luminiscencia. Optar por una u otra (**Tabla 1.6.**) dependerá del objetivo del estudio, el presupuesto y la escalabilidad deseada.

Tabla 1. 6. Comparativa de rentabilidad y el rendimiento cuántico (QY) de diferentes precursores orgánicos empleados en la síntesis de CQDs.

Moléculas orgánicas purificadas			Materiales de origen natural o residuos orgánicos		
Precursor	Precio aprox. (USD / 10 g)	Rendimiento cuántico	Precursor	Precio aprox. (USD / 10 g)	Rendimiento cuántico
Ácido cítrico [171], [172]	2	80	Trigo [10]	0.1	45
Glucosa [173]	1.5	70	Plátano [174], [175]	0.05	40
Urea [176]	1	60	Té verde [177]	0.02	38
Glicerol [178]	3	50	Aloe vera [179]	0.1	42
Ácido láctico [180]	4	65	Jugo de melón [181]	0.2	48
Ácido ascórbico [182]	6	75	Kiwi [183]	0.15	43
Anilina [184]	8	68	Residuos de café [185]	0.05	46
Etanolamina [186]	5	63	Agua de coco [187]	0.1	39
Ácido glutámico [188]	7	72	Cáscara de arroz [189], [190]	0.02	44
Glicina [191]	3.5	66	Batata [192]	0.03	41
Lignina [193]	2.5	58	Naranja [194]	0.5	47
Ácido fólico [195]	9	77	Bagazo de caña [196], [197]	0.1	49

1.4. Modificación estructural o superficial

Los CQDs desnudos, es decir, sin alguna modificación, están compuestos principalmente por carbono y oxígeno [14]; sin embargo, presentan rendimientos cuánticos (QY) relativamente bajos menores al 35 % [198]. Una alternativa para optimizar y ajustar sus propiedades ópticas, químicas y electrónicas (y así ampliar su rango de aplicaciones) es la modificación superficial y estructural [199].

Esta puede clasificarse en dos categorías [200].

1.4.1. Modificación estructural (Dopaje estructural)

El dopaje estructural es una estrategia sencilla y rentable para modificar la estructura interna de los CQDs mediante la incorporación de heteroátomos dentro de la red de carbono (**Figura 1.15.**) [163], [201]. Esta técnica permite ajustar la distribución electrónica y modificar la densidad de estados, lo cual influye directamente en propiedades como la luminiscencia, QY y parámetros electrónicos como el ancho de banda CQD [202].

Las vías más comunes para lograr esta modificación incluyen métodos como la pirólisis [203] y la síntesis hidrotermal [204], empleando precursores que contengan los heteroátomos deseados [205]. Estos heteroátomos pueden clasificarse en dos grupos:

- I. *No metales*: Uno de los precursores más utilizados es el amoníaco (NH_3), que permite dopar la estructura de los CQDs con nitrógeno, siendo este el elemento no metálico más usado [206]. Otros elementos no metálicos que mejoran significativamente las propiedades ópticas y aumentan el QY son el azufre, fósforo, silicio y potasio [207], [208].
- II. *Metales*: La incorporación de elementos metálicos puede conferir nuevas propiedades a los CQDs. Por ejemplo, el dopaje con cobre incrementa su actividad catalítica, dado que este metal es un fuerte donador y aceptor de electrones [209], [210]; mientras que el dopaje con gadolinio otorga propiedades magnéticas útiles en resonancia magnética como agentes de contraste. No obstante, es importante considerar, que la adición de estos elementos en altas concentraciones puede aumentar la toxicidad del material [211].

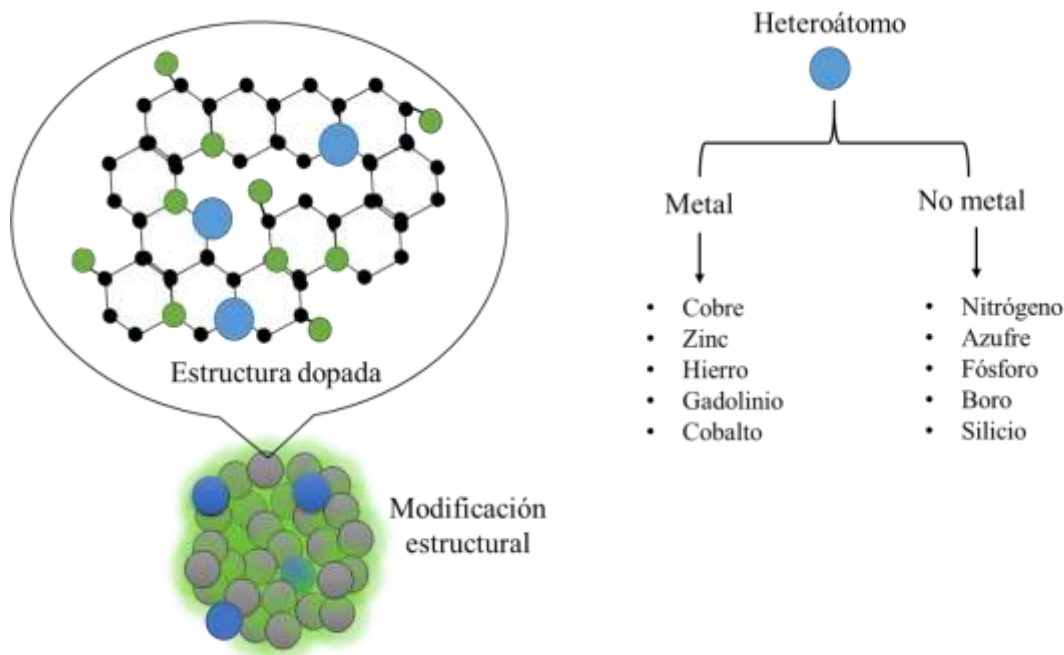


Figura 1. 15. Modificación estructural o dopaje estructural de los CQDs con diferentes heteroátomos

Existen numerosos estudios que reportan la modificación estructural de los CQDs, en los cuales la variabilidad de los heteroátomos influye de manera diferente en sus propiedades (**Tabla 1.7.**) [212]. La elección del tipo de dopante, ya sea metálico o no metálico, dependerá del objetivo funcional de los CQDs buscando optimizar las propiedades deseadas.

Tabla 1. 7. Comparativa bibliográfica en el heteroátomo dopante, el efecto que provoca y la aplicación de los diferentes CQDs reportados.

Dopante	Efecto	Aplicación
Nitrógeno	Aumentar el QY y mejorar biocompatibilidad	• Bioimagen [213] • Sensores fluorescente [214]
Azufre	Aumentar la luminiscencia y funcionalización	• Detección de iones Fe^{3+} [215] • Detección de metronidazol [216]
Fósforo y Boro	Cambiar las propiedades electrónicas y mejora la transferencia de carga	• Películas retardante de llamas [217] • Detección de rutina [218] • Antifalsificación [219]
Cobre	Aumenta la actividad catalítica	• Terapia dirigida contra el cáncer [220] • Biopelículas cicatrización de heridas [221]

Hierro	Introduce propiedades magnéticas	• Almacenamiento de energía [222] • Actividad inmunoantitumoral [223] • Actividad fototérmica-quimiodinámica del cáncer [224]
Gadolinio	Agente de contraste para imagenología	• Imágenes de resonancia magnética [225] • Resonancia magnética y tomografía computarizada [226]
Manganeso	Propiedades magnéticas y catalíticas	• Tratamiento guiado por resonancia magnética contra el Parkinson [227] • Actividad antibacteriana [228]
Cobalto	Mejora la capacidad de almacenamiento de energía	• Almacenamiento de energía [222]

1.4.2. Modificación de superficie

Otra de las estrategias para mejorar las propiedades de los CQDs es la modificación superficial. A diferencia de la introducción de heteroátomos que se realiza durante la síntesis, esta técnica requiere un paso posterior a la formación de los CQDs [229]. El proceso implica la interacción de los CQDs con ligandos mediante interacciones electrostáticas, enlaces de coordinación o enlaces covalentes [14], aprovechando la abundancia de grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos y aminas, presentes en la superficie [230].

Los ligandos que se pueden unir a los CQDs se clasifican principalmente en cuatro tipos (**Fig. 1.16.**):

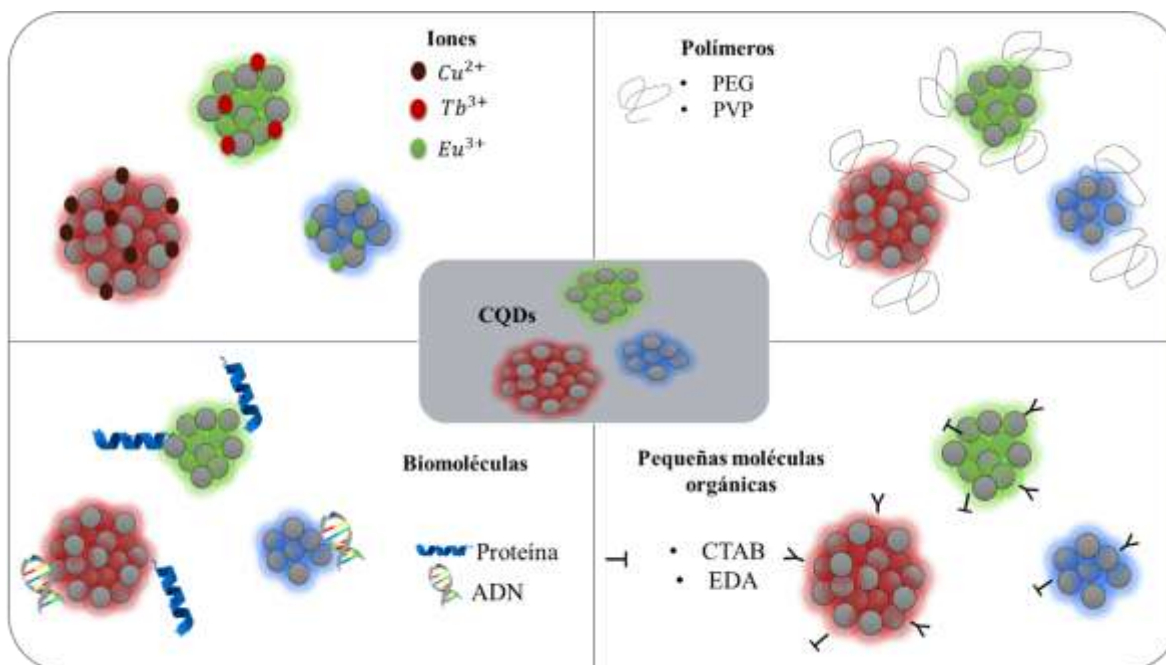


Figura 1. 16. Modificación superficial con diferentes ligandos.

I. *Modificación con iones:* Este tipo de modificación utiliza iones metálicos o lantánidos que interactúan con la superficie de los CQDs, modificando alterando sus propiedades ópticas y electrónicas [231]. En la literatura se reportan diversos iones (**Tabla 1.8.**), siendo los más comunes son el Cu^2 [232] o Fe^{3+} [233] los cuales modifican la actividad catalítica. Por otro lado, los lantánidos como el Eu^{3+} y Tb^{3+} modifican las propiedades de luminiscencia favoreciendo aplicaciones como nanosondas o sensores [234]–[236].

Tabla 1. 8. Comparativa bibliográfica de iones ligando, propiedades modificadas y aplicaciones de los CQDs.

Ion utilizado	Propiedad modificada	Aplicación
Ag^+ [237]	Superficie más selectiva	Biotedeccción
Zn^{2+} [85]	Longitudes onda de emisión, <i>quenching</i>	Detección de fármacos
Tb^{3+} [238]	Tiempo de emisión más largo, longitud de onda más larga	Detección de ántrax
Mn^{2+} [239]	Aumento de propiedades de capacitancia	Superconductores

Eu ³⁺ [240]	Mejora la densidad electrónica y actividades químicas superficiales	Sondas fluorescentes
Al ³⁺ [241]	Transferencia de energía, emisiones mejoradas	NA

II. *Modificación con polímeros:* Esta estrategia es de las común para aumentar el QY, mejorar la estabilidad coloidal, reducir la toxicidad y facilitar la interacción con sistemas biológicos [242]. Es especialmente útil en aplicaciones como la liberación controlada de fármacos [243] y generación de bioimágenes [244]. En la literatura se reportan distintos polímeros que interactúan con los CQDs (**Tabla 1.9.**), siendo los más empleados el polietilenglicol (PEG) [245] y la polivinilpirrolidona (PVP) [246], [247].

Tabla 1. 9. Comparativa bibliográfica de polímeros utilizados para modificar la superficie de los CQDs.

Polímero utilizado	Propiedad modificada	Aplicación
PEG [248]	Conversión fototérmica	Tratamiento de cáncer
PEI [69]	Aumento en las emisiones	No reportado
PVA [249]	Hidrofobicidad, flexibilidad y resistencia	Almacenamiento de energía
Quitosano [18]	Interacciones entre anillos y enlaces π	Eliminación de contaminantes ambientales
Ácido poliacrílico (PAA) [250]	Control de energía (donante)	Detección de verde malaquita
PEG [13]	Propiedades de luminiscencia	No reportado

III. *Modificación con pequeñas moléculas orgánicas:* Esta estrategia mejora las propiedades de fluorescencia, solubilidad y compatibilidad biológica, permitiendo diseñar CQDs con afinidad hacia células dañadas o estructuras biológicas específicas útiles en imagen celulares [251]. Las moléculas más frecuentes incluyen etilendiamina (EDA) [252], bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) [253], ácido fólico [254], entre otras (**Tabla 1.10.**).

Tabla 1. 10. Comparativa bibliográfica de pequeñas moléculas orgánicas que modifican la superficie de los CQDs y su efecto en las propiedades y aplicaciones.

Molécula utilizada	Propiedad modificada	Aplicación
--------------------	----------------------	------------

1, 2, 3-triazol [255]	Estabilidad térmica y fotoestabilidad	Actividades anticancerígena
Ácido fólico [256]	Mejora la recepción con células	Reconocimiento de células cancerosas
Folato [257]	Fluorescencia dirigida	Biomagen
Ácido fólico [258]	Aumento de selectividad y QY	Imágenes de fluorescencia de células cancerosas
Organosilano [259]	Solubilidad y biocompatibilidad	Desarrollo de nuevos materiales
EDA [260]	Mejora en los QY	Detección de iones de Fe

IV. *Modificación con biomoléculas:* Esta es una de las estrategias más avanzada ya que permite dotar a los CQDs capacidad de reconocimiento molecular específico, lo que resulta ideal para liberación controlada, diagnóstico y bioimagen inteligente [261]. Entre las biomoléculas (**Tabla 1.11**) destacan ADN [262], diferentes proteínas [263] y anticuerpos [264].

Tabla 1. 11. Comparativa bibliográfica de biomoléculas que modifican la superficie de los CQDs, mecanismo de acoplamiento y aplicaciones biomédicas.

Biomolécula utilizada	Mecanismo de acoplamiento	Aplicación biomédica
Albúmina sérica humana [265]	Enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals	Alimentos, proteína albúmina humana
Pepsina [266]	A través de grupos hidroxilos, amino y carboxilos	Digestión de proteínas
Hemoglobina humana [267]	Enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals	Efecto de la proteína plasmática humana
Albumina sérica humana [268]	Interacción dinámica o estática	Seguridad en alimentos
Dopamina [269]	Transferencia de energía por resonancia	Seguridad de alimentos

1.5. Aplicaciones biológicas de bioimagen

Los CQDs forman parte de una clase de nanomateriales que, además de sus destacadas propiedades ópticas y electrónicas previamente descritas presentan una biocompatibilidad excepcional, alta dispersabilidad en medios acuosos, baja citotoxicidad, elevada viabilidad celular y biodegradabilidad. Estas características los convierte en candidatos idóneos para múltiples aplicaciones biomédicas en el área de salud [270].

Gracias a estas propiedades, los CQDs se han empleado en el diseño de nanodispositivos capaces de administrar biomoléculas de manera selectiva y controlada, incluyendo proteínas, fármacos, anticuerpos monoclonales y ácidos nucleicos [271]. En la Actualidad se consideran una alternativa prometedora para el tratamiento de cáncer, infecciones microbianas, terapias con células madre y, de manera destacada en la generación de bioimagen (**Fig. 1.17.**) [272].

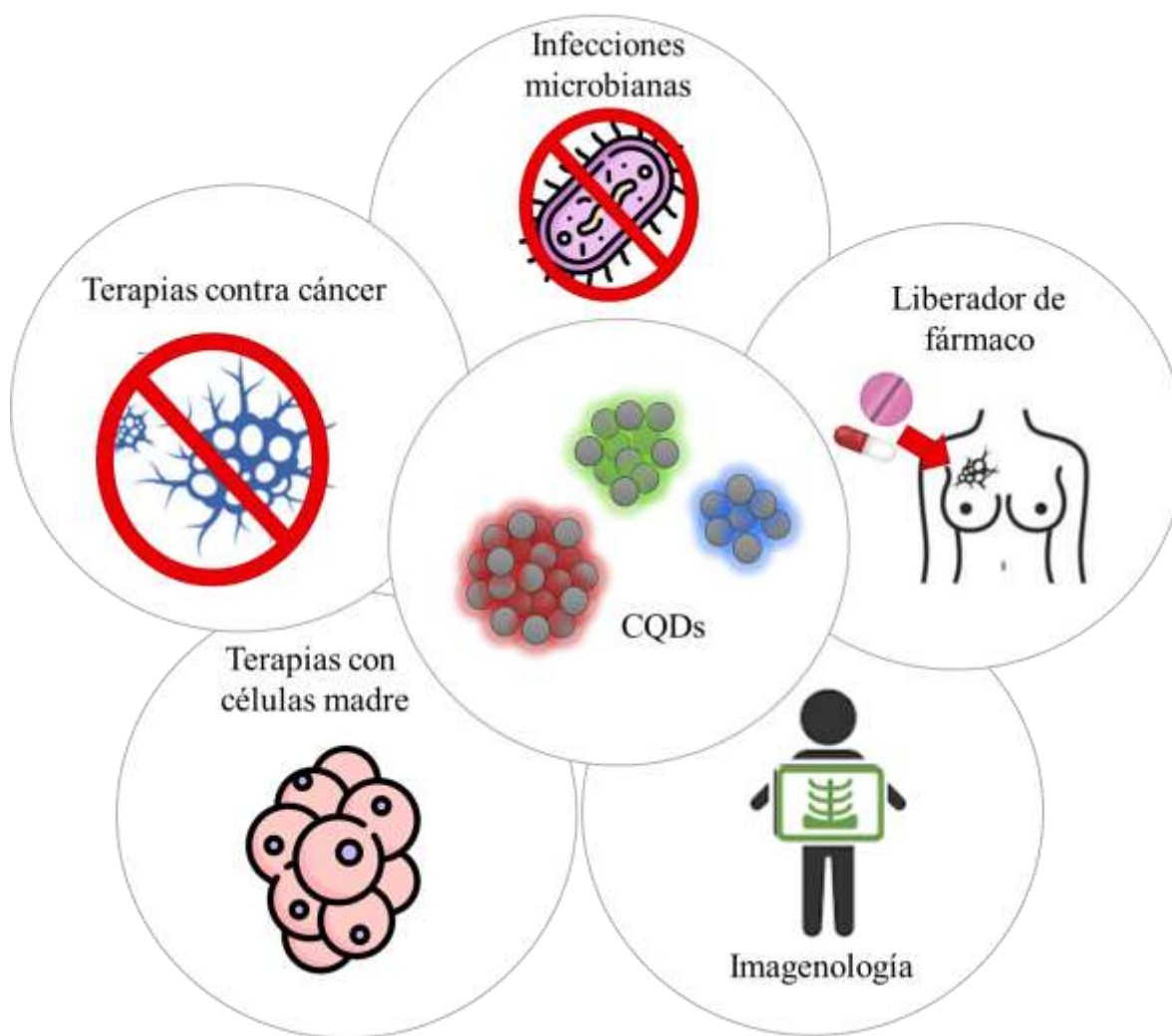


Figura 1. 17. Diferentes aplicaciones biológicas para los CQDs.

1.5.1. Evaluación de citotoxicidad y viabilidad celular

Antes de emplear los CQDs en sistemas biológicos, es fundamental evaluar su seguridad [273]. Esta evaluación incluye la determinación de la citotoxicidad y la viabilidad celular mediante ensayos *in vitro* o *in vivo*, con el fin de confirmar que estas nanopartículas no

provocan efectos adversos en células o tejidos [274]. Los resultados permiten establecer la concentración máxima segura de CQDs que pueden utilizarse en entornos biológicos, así como estudiar las interacciones entre estas nanopartículas y los componentes celulares [275]. La viabilidad celular puede verse influida por factores como el tamaño de partícula, la carga superficial, la presencia de grupos funcionales, el dopaje o la modificación superficial [276].

Este parámetro se refiere al porcentaje de células que parecen vivas y funcionales tras la exposición a los CQDs durante un periodo determinado. Por su parte, la citotoxicidad es un concepto más amplio, que describe el grado en que una sustancia puede dañar o destruir células.

Existen varios métodos estandarizados para la evaluación de la viabilidad celular entre los más reportados para los CQDs se encuentran:

- I. *Ensayo MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolio bromuro)*: Uno de los más utilizados. Se basa en la capacidad de que las mitocondrias activas de reducir el tetrazolio. Es una técnica colorimétrica, con la formación de formazán se aprecia un cambio de color a púrpura que se cuantifica por espectrofotometría.
- II. *Ensayo CCK-8 (Cell Counting Kit-8)*: Se fundamenta en la conversión de un sustrato de tetrazolio por deshidrogenasas celulares activas, produciendo un compuesto soluble en agua, lo que permite una lectura directa.
- III. *Ensayos de exclusión con azul de tripano*: Diferencia células vivas de muertas, ya que las primeras excluyen el colorante, mientras, que las segundas lo absorben debido al daño o pérdida de integridad en la membrana

En general los CQDs presentan baja citotoxicidad en diversas líneas celulares y concentraciones (**Tabla 1.12.**). No obstante, cada nuevo sistema debe evaluarse individualmente, ya que, modificaciones en las condiciones de síntesis, estructura o superficie pueden alterar su comportamiento biológico [277]. Además, estos ensayos pueden complementarse con análisis de estrés oxidativo (ROS) o pruebas de daño en el ADN (como el ensayo Cometa), con el fin de obtener un perfil toxicológico más completo [278].

Tabla 1. 12. Comparativa bibliográfica en la evaluación de la viabilidad celular en los CQDs, considerando a las diferentes líneas celulares, tipos de ensayos y concentraciones evaluadas.

Tipo de CQDs	Líneas celulares	Ensayos utilizados	Concentraciones evaluadas	Resultados claves
Dopados con boro, azufre y nitrógeno [279]	HepG2 y SiHa	MTT	500 y 50 µg/mL	Daño moderado 77.7% para HepG2 y 72.3 % en SiHa en 4 h de incubación
CQDs con emisión amarilla [280]	KB	MTT	0,2 a 1,0 mg/mL	La viabilidad celular disminuye con la concentración, presentando baja toxicidad.
CQDs fluorescencia roja de doble enlace [281]	HCT116	MTT	0.25 a 1.0 mg/mL	Viabilidad celular alta >90 % a 1,0 mg/mL en un tiempo de incubación 24 h.
CQDs modificados con N,N-dimetiletildiamina [282]	HeLa	MTT	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80 µg/mL	Viabilidad de 85 % a 80 µg/mL después de un tiempo de incubación de 4 h, a 30 µg/mL hasta un 100% después de 36 h
CQDs derivados de <i>Crataegi Fructus</i> [283]	Caco-2, MDA-MB-231 y MCF-7	MTS	0,4–2,0 mg/mL	MDA-MB-231 y MCF-7 supera el 90 % de viabilidad celular en todas las concentraciones, Caco-2 disminuye con el aumento de la concentración
CQDs desnudos [284]	L929	CCK-8	200 µg/mL	La densidad celular aumenta, presentando un crecimiento celular a largo plazo
CQDs de grafeno derivados de leche [285]	L929, MDA-MB-231 y HeLa	azul tripán y MTT	200 µg/mL	Fueron biocompatibles en todos las células en tiempos de 24 y 48 h
CQDs magnéticos (dopados con Gd) [286]	THLE-2 y HepG2	CCK-8	3,125, 6,25, 12,5, 25, 50, 100, 200 y 400 µg/mL	Buena viabilidad a concentraciones bajas, en máximas concentraciones en 24 h de incubación tiene viabilidad celular de 55 %
CQDs a base de hongos multicolores [287]	RAW 264.7	MTT	0 a 1 mg/mL	Viabilidad mayor a 87.3 % después de 24 h.

CQDs dopados con Cu [288]	HaCaT y HDF	CCK-8	0.1, 1, 5 $\mu\text{g/mL}$	Presentan una actividad metabólica normal a diferentes concentraciones
CQDs con nitrógeno y fósforo anclado a un fármaco [289]	SH-SY5Y	MTT	0.625, 1.25, 2.5 y 5 $\mu\text{g/mL}$	No afectaron la actividad metabólica, la viabilidad reduce con el fármaco
CQDs dopados con Tb^{3+} y Eu^{3+} [290]	Bazo de rata	azul tripán	4.88, 12.2, 24.4, 64 y 122 $\mu\text{g/mL}$	Viabilidad de 97 % en todas las concentraciones
CQDs dopados con Mg^{2+} [291]	MC3T3	MTT	200-800 $\mu\text{g/mL}$	La viabilidad disminuye con el aumento de la concentración hasta un 85 %
CQDs desnudos de curcumina [292]	AML12	CCK-8	5, 10, 20, 40, 80, 160 y 320 ppm	Viabilidad >85 % en todas las concentraciones

1.5.2. Generación de imagen celular con CQDs

La generación de imágenes celulares es una de las aplicaciones más reportadas de los CQDs atribuida a sus propiedades ópticas, como la fluorescencia, estabilidad fotoquímica y biocompatibilidad [293]. En comparación con otros materiales luminiscentes, presentan menor toxicidad, mayor estabilidad en medios biológicos y buena dispersión en soluciones acuosas [294], características que los convierte en excelentes alternativas para el contraste y la visualización de estructuras celulares [295].

Una de las principales ventajas de los CQDs en bioimagen es su capacidad para emitir luz bajo la excitación de diferentes longitudes de onda (**Fig. 1.18.**), lo que permite la obtención de imágenes multicanal sin interferencia por autofluorescencia celular [296].

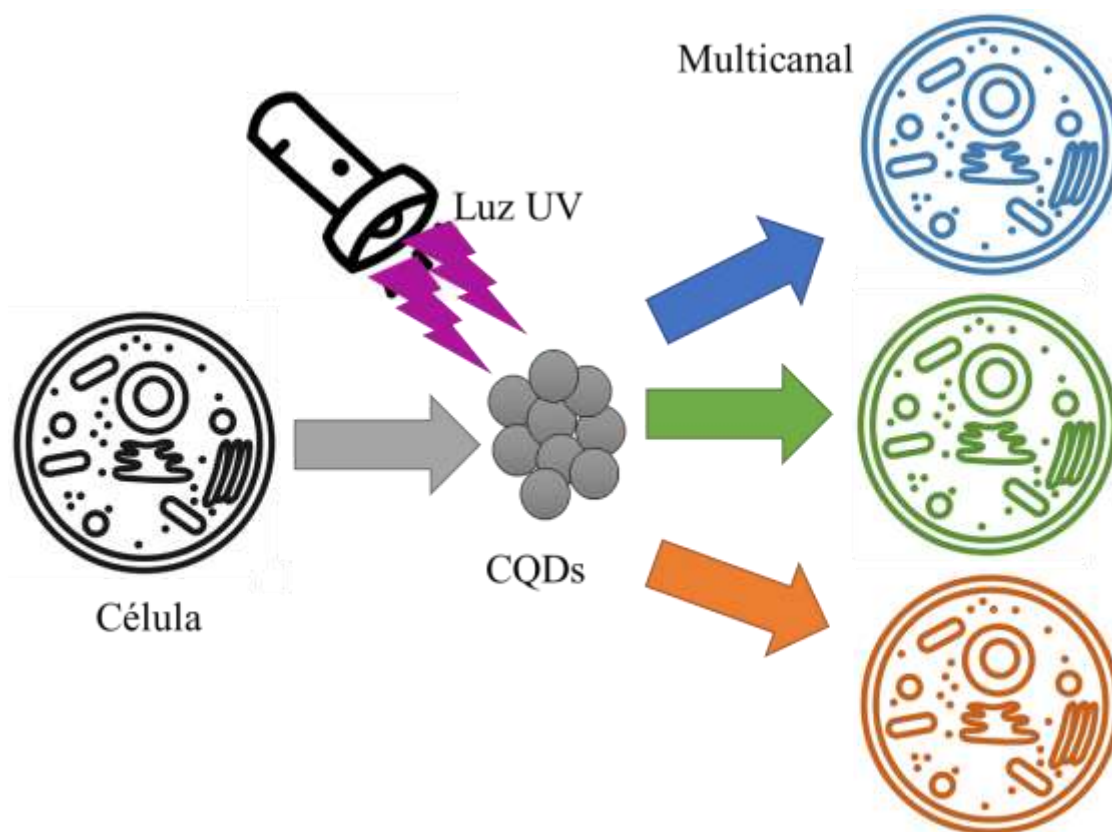


Figura 1. 18. Generación de biomagen celulares a partir de la excitación multicanal.

Los puntos cuánticos de carbono (CQDs) se han consolidado como agentes versátiles para la bioimagen celular debido a su alta fluorescencia, estabilidad fotoquímica y baja citotoxicidad (**Tabla 1.13**). Para obtener imágenes celulares, se han empleado principalmente técnicas de microscopía de fluorescencia y microscopía confocal, las cuales permiten visualizar con precisión la localización intracelular de los CQDs, así como evaluar su penetración y dispersión en diferentes líneas celulares. Estas metodologías ofrecen imágenes de alta resolución espacial y, en el caso de la confocal, permiten reconstrucciones tridimensionales y secciones ópticas en tiempo real. La elección de la técnica y la efectividad de los CQDs dependen tanto de su composición (dopaje, funcionalización) como de su interacción con el microambiente celular. Por ello, cada nuevo sistema de CQDs debe ser caracterizado individualmente en función de sus propiedades ópticas y comportamiento biológico. La integración de estas herramientas de imagen con estudios de viabilidad celular proporciona una plataforma poderosa para aplicaciones en diagnóstico, rastreo celular y monitoreo terapéutico.

Tabla 1. 13. Comparativa bibliográfica sobre la generación de imagen celular con CQDs, indicando líneas celulares, ensayos utilizados, concentraciones evaluadas y resultados clave.

Tipo de CQDs	Líneas celulares	Ensayos utilizados	Concentraciones evaluadas	Resultados claves
CQDs dopados con N y S [297]	SVG p12	Calceína-AM / Yoduro de propidio, Hoechst, Microscopía de fluorescencia	100, 500 y 1000 µg/ml	Alta biocompatibilidad, sin citotoxicidad; atraviesan membrana y marcan núcleo; fluorescencia estable para rastreo celular a largo plazo.
CQDs dopados con Eu [298]	HeLa	MTT, Microscopía de fluorescencia, ensayo de internalización (NMM)	Hasta 1000 µg/mL	Alta biocompatibilidad, promueven proliferación celular, fluorescencia roja intensa e internalización rápida en 20 min; excelente para bioimagen celular.
CQDs funcionalizados con ácido fólico [299]	RAW y COS-7	Microscopía confocal	200 µg/mL	Baja toxicidad en ambas líneas celulares; CQDs mostró fluorescencia específica en células RAW (tumores), no en COS-7; mejora compatibilidad y señal óptica.
CQDs dopados con N y S [300]	HCT-116	Microscopía confocal (CLSM), detección FL on-off-on	0–150 µg/mL	Alta biocompatibilidad (>94 % viabilidad), fluorescencia reversible por interacción con Fe ³⁺ ; excelente captación intracelular y potencial como nanosensor fluorescente.
CQDs quirales [301]	HeLa	Microscopía de fluorescencia	0–400 µg/mL	Alta biocompatibilidad (>80 % viabilidad); captación óptima a 2 h.
CQDs con longitud de onda infrarroja cercano [302]	MCF-7	Microscopía confocal,	50 µg/mL	Alta viabilidad (>98 %); fluorescencia roja intensa

		colocalización con DiO		localizada en membrana celular.
CQDs dopados con N y Si [303]	A549	Microscopía confocal, doble tinción con SYTO9	200, 300, 400 µg/mL	Alta viabilidad (>90 %); fluorescencia azul intensa en citoplasma; señal estable tras 24 h; utilidad para bioimagen citoplasmática a largo plazo.
CQDs dopados con Yb y Er [304]	HeLa, 4T1 y HEK293	Microscopía confocal, DAPI, análisis cinético y de intensidad FL	1–50 µg/mL	Alta biocompatibilidad (>85 % viabilidad); fluorescencia rápida; imagen estable en citoplasma y núcleo; útil para bioimagen de amplio rango.
CQDs dopados con N [305]	HepG2	Microscopía confocal	50 µg/mL	Fluorescencia azul brillante y estable; captación eficiente por endocitosis; viabilidad del 80–92% según la dosis; baja toxicidad y buena fotoestabilidad.
CQDs de residuos plásticos [306]	HeLa	Análisis antibiofilm con naranja de acridina, imagen multicanal	1–1000 µg/mL	Alta biocompatibilidad, fluorescencia azul, verde y roja; excelente permeabilidad celular; fuente sostenible con potencial terapéutico.
CQDs dopados con La y N [307]	4T1	Microscopía confocal	0–25 µg/mL	Alta biocompatibilidad; fuerte fluorescencia azul en citoplasma; captación eficiente; útiles para imagen en células y peces, y detección de iones in vivo.
CQDs funcionalizados con ácido fólico y ácido hialurónico [308]	MCF-7 y EC	Microscopía confocal (CLSM), imagen selectiva a 488 nm	150 µL de muestra	Fluorescencia verde brillante solo en células tumorales; FA-CD mostró mayor especificidad que HA-CD; localización citoplasmática; buena internalización y potencial diagnóstico dirigido.



Capítulo 2.

Experimental

El presente capítulo se indica los reactivos y materiales, así como, la descripción de la metodología para la obtención y caracterización de partículas en cada experimentación planteada, además, de los ensayos de citotoxicidad y generación de imágenes celulares.

“Hay tres maneras de hacer las cosas: la correcta, la incorrecta y la mía”

-Sam “Ace” Rothstein (Robert De Niro)

2.1. Materiales y reactivos

Reactivos

- PEG
- H₂SO₄
- NaOH
- Quitosano
- Cloruro Férrico (FeCl₃)
- Cloruro Ferroso (FeCl₂)
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- DMSO 10%
- PBS
- MTT
- Medio (90% F-12K y 10% Suero bovino)
- DAPI
- Glutaraldehído al 2.5%

Precursores

- Durazno
- Pera
- Plátano
- Guayaba
- Fresa
- Piña
- Calabaza
- Sandía

2.2. Metodologías experimentales

2.2.1. Síntesis CQDs

Para la obtención de los CQDs se emplearon como precursores distintas fuentes vegetales: durazno (*Prunus pérsica*), pera (*Pyrus communis*), plátano (*Musa × paradisiaca*), guayaba (*Psidium guajava*) y fresa (*Fragaria × ananassa*) para la obtención de los CQDs. La metodología experimental se resume en la **Figura 2.1**. Se describe a continuación.

Se prepararon los precursores con 10 g de materia sólida, los cuales se homogenizaron en 80 mL de agua desionizada en forma de jugo. La solución resultante se sometió a síntesis hidrotermal en autoclave de teflón de 100 mL a una temperatura de 200 °C durante 4 h. Finalizada la reacción, el sistema se dejó enfriar a temperatura ambiente para proceder con la separación de partículas, la cual se realizó en tres etapas:

1. *Decantación*: Por diferencia de densidades, se separaron las fases líquidas y sólidas.
2. *Centrifugación*: La muestra se centrifugó a una velocidad <8,000 rpm con el fin de reducir y homogenizar el tamaño de partícula en la fracción coloidal.
3. *Filtración*: Mediante filtros con poro menor a 0.2 μ, se eliminaron partícula de tamaño mayor obteniendo así una suspensión enriquecida en CQDs.

Finalmente, los CQDs en solución acuosa caracterizaron inmediatamente mediante las técnicas descritas en secciones posteriores.

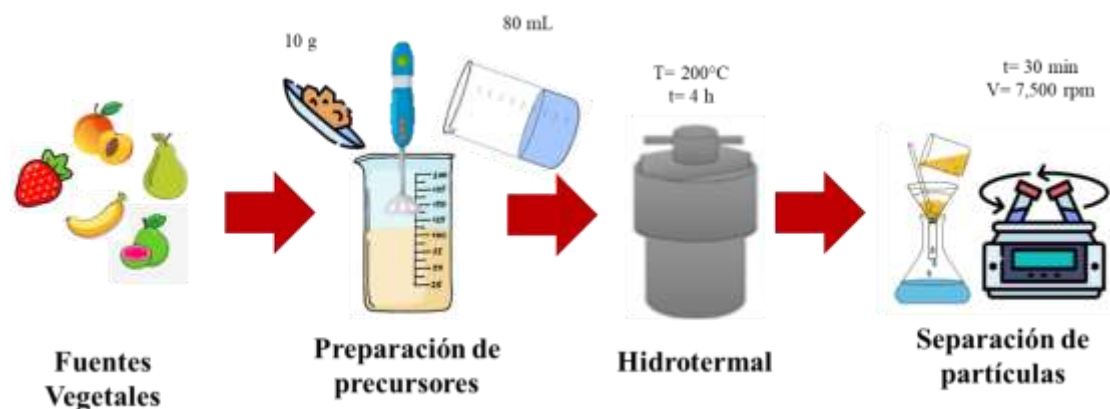


Figura 2. 1. Metodología experimental para la síntesis de CQDs desnudos.

2.2.2. Síntesis de CQDs PEGilados

Se utilizó piña (*Ananas comosus*) como fuente vegetal precursora para la obtención de CQDs desnudos y CQDs-PEG, mediante el método hidrotermal. La síntesis se describió (**Figura 2.2.**) de la siguiente manera:

El precursor se preparó en forma de jugo empleando 10 g de piña y 80 mL de agua desionizada. Posteriormente, el jugo se colocó en una autoclave de teflón de 100 mL para llevar a cabo la reacción hidrotermal a temperatura de 200°C durante 4 h. Una vez concluida la síntesis hidrotermal, la solución se dejó enfriar a temperatura ambiente y las partículas se separaron, mediante filtración al vacío.

La modificación superficial de los CQDs-PEG se realizó añadiendo en 15 mL de la solución de CQDs diferentes masas de PEG (0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 g) bajo agitación constante de 200 rpm durante 2 h sin modificar el pH. De manera independiente, se ajustó el pH de 15 mL de CQDs a valores de 2, 3.4 (pH inicial), 4, 8 y 11, utilizando soluciones de H_2SO_4 y NaOH (1 M) para posteriormente adicionar 0.75 g de PEG bajo las mismas condiciones de agitación y tiempo de reacción.

Al término de la reacción, el producto obtenido se centrifugó a 7,500 rpm y se filtró empleando papel filtro con tamaño de poro de 0.2 μ .

Finalmente, el producto se caracterización de manera inmediata.



Figura 2. 2. Metodología experimental para la síntesis de los PEG-CQDs.

2.2.3. Síntesis de CQDs-Ch

Se utilizó calabaza (*Cucúrbita moschata Duchesne*) como fuente vegetal precursora para la obtención de CQDs desnudos y CQDs-Ch mediante el proceso hidrotermal. La síntesis se describe en la **Figura 2.3** a continuación.

Se preparó un jugo con 10 g de calabaza y 80 mL de agua desionizada. La mezcla se colocó en una autoclave de teflón de 100 mL y se sometió a reacción hidrotermal a 200 °C durante 4 h. Posteriormente, la solución obtenida, se dejó enfriar a temperatura ambiente y las partículas fueron separadas mediante filtración al vacío.

Para la modificación de superficie de los CQDs con quitosano (CQDs-Ch), se 15 ml de la solución obtenida de CQDs con diferentes masas de quitosano (0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 g) bajo agitación constante de 200 rpm durante 2 h. De manera independiente, se tomaron 15 mL de CQDs para evaluar el efecto de la temperatura (20, 30, 40, 50 y 60 °C) sobre la interacción con quitosano (0.5 g), manteniendo una agitación constante de 200 rpm durante 2 h.

Finalizado el tiempo de reacción, los productos obtenidos fueron centrifugados a 7,500 rpm y posteriormente, filtrados con papel filtro de tamaño de poro de 0.2 μ .

El producto final se caracterizó de manera inmediata mediante las técnicas descritas en la sección correspondiente.

El producto final se llevó a caracterización.



Figura 2. 3. Metodología experimental para la síntesis de los Ch-CQDs.

2.2.4. Funcionalización con Fe₃O₄

Se utilizó sandía (*Citrullus lanatus*) como fuente vegetal para la obtención de los CQDs. Para la síntesis de Fe₃O₄ se emplearon soluciones de FeCl₃ (1 M) y FeCl₂ (1 M), además de NaOH (1 M) para el ajuste de pH. El procedimiento se describe en la **Figura 2.4**.

Inicialmente, las soluciones de FeCl₃ (1 M) y FeCl₂ (1 M) fueron colocadas bajo agitación a 600 rpm durante 10 min. Posteriormente, se fue adicionó de manera gradual la solución de NaOH (1 M) hasta alcanzara un pH de 7, manteniendo la agitación constante.

A Continuación, se incorporaron diferentes volúmenes de jugo de sandía (0, 10, 20, 30 y 40 mL) a la mezcla obtenida. Las soluciones resultantes fueron transferidas a un autoclave de teflón de 100 mL y sometidas a reacción hidrotermal a 200 °C durante 4 h. Posteriormente, la mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente y las partículas fueron separadas por decantación.

Se obtuvieron dos fases:

1. *Fase líquida*. La cual se llevó a centrifugación a una velocidad de $<8,000$ rpm los CQDs en solución comienzan a separarse para así disminuir y homogenizar el tamaño de partícula y una filtración: con el tamaño de poro menor a $0.2\ \mu$, se eliminó toda aquella partícula con tamaño mayor.
2. *Fase sólida*. el sólido fue sometido a lavados por triplicado con agua desionizada mediante centrifugación a $4,000$ rpm durante 10 min cada ciclo. Finalmente, el material fue secado en un horno a $90\ ^\circ\text{C}$ durante 24 h.

Los productos finales fueron llevados a caracterización inmediata.

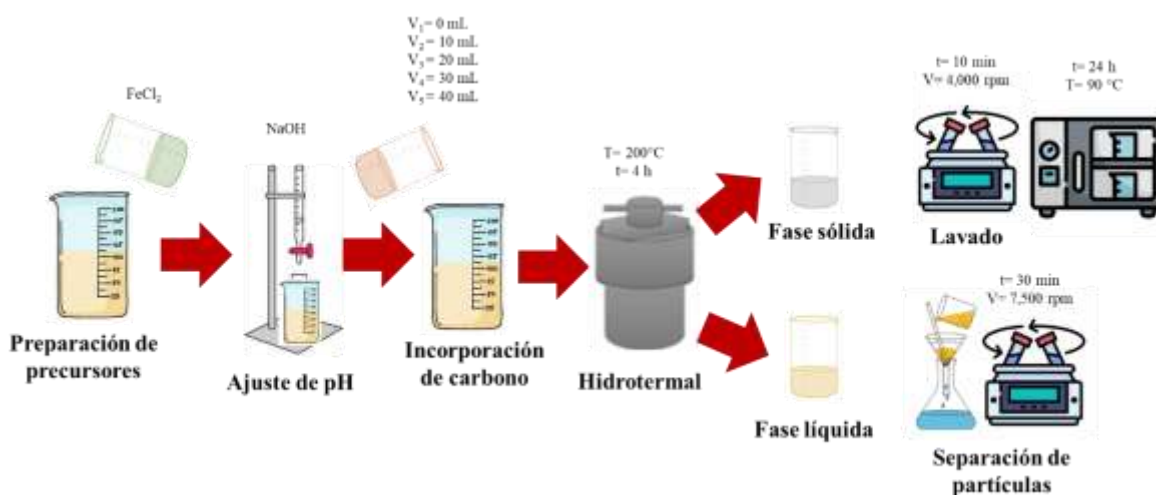


Figura 2. 4. Metodología experimental para el compuesto de Fe_3O_4 -CQDs y los L-CQDs

2.3 Ensayo MTT

2.3.1. Preparación de las células

La línea celular PC-3 de cáncer de próstata, previamente cultivadas en T25, fueron lavadas con PBS, tratadas con $500\ \mu\text{L}$ de Tripsina $1\times$, e incubadas durante 5 min a 37°C . Transcurrido este tiempo, se agregaron 1.5 mL de medio de cultivo DMEM:F12 suplementado con SFB para inactivar la tripsina y recuperar las células. La suspensión celular se centrifugó a $1,600$ rpm., durante 7 min.

El sobrenadante fue retirado y las células se suspendieron en 1 mL de medio fresco. Para el conteo de celular, se preparó una mezcla de $90\ \mu\text{L}$ de PBS y $10\ \mu\text{L}$ de células de suspensión

celular, la cual se depositó en una cámara de Neubauer con el fin de determinar la concentración celular por mililitro.

2.3.2. Preparación del material

Se pesó 1 mg del compuesto $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$ y se dispersó en 1 mL de medio de cultivo mediante baño ultrasónico durante 15 min.

2.3.3. Realización del MTT

Se prepararon diluciones del material a 62.5, 125, 250 y 500 $\mu\text{g/mL}$ y se depositaron junto con 12,000 células por pozo para el ensayo a 24 horas y 8,000 células por pozo para el ensayo a 48 h. Todos los experimentos se realizaron por triplicado, de acuerdo con el siguiente esquema representado en la **Figura 2.5**.

En los pozos de control se depositaron únicamente células con medio (control de viabilidad), DMSO al 10% (control de citotoxicidad) y medio con MTT (control de reacción).

Pasando el tiempo de incubación correspondiente, el medio fue retirado de todos los pozos y se adicionaron 100 μL de MTT en cada uno. Las placas fueron incubadas por 3.5 h y posteriormente, se agregó DMSO para solubilizar los cristales de formazán. Finalmente, las placas se colocaron en agitación a 30 rpm durante de 30 min.

Para finalizar la placa se introduce al equipo que cuantifica el color mediante la transmitancia para hacer la comparación con los controles.

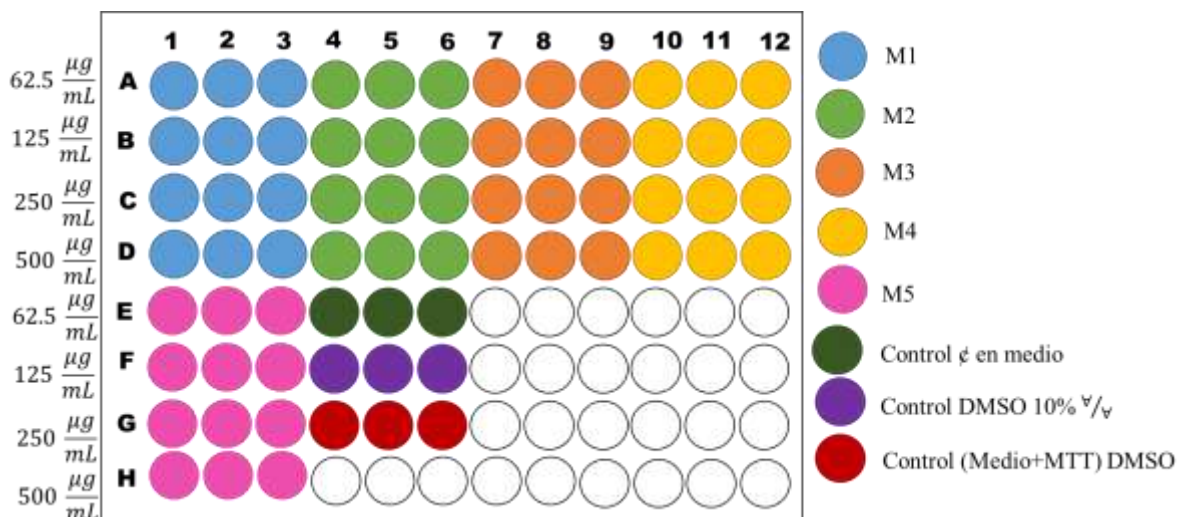


Figura 2. 5. Diagrama para los pozos del ensayo MTT.

2.4. Bioimágenes

2.4.1. Preparación de las células y del material

Las células y el material se prepararon de manera análoga al procedimiento descrito para el ensayo MTT.

2.4.2. Realización de las bioimágenes

Se preparó una dilución del material a 125 $\mu g/mL$, la cual fue depositada junto con 100,000 células en cada pozo, de acuerdo con el esquema experimental (**Figura 2.6**). Las placas se incubaron durante 2, 24 y 48 h. En los pozos de control, únicamente se cultivaron células en medio.

Finalizado el tiempo de incubación. Las células fueron lavadas con PBS y fijadas mediante la adición de 500 μL de glutaraldehído al 2.5% durante 30 min a temperatura ambiente.

Posteriormente, se añadió de DAPI (100 μL) y se dejó reaccionar por 15 min. Para poder tomar las fotos en el generador de imagen con la luz verde ($\lambda_{ex} = 480 \text{ nm}$, $\lambda_{em} = 517 \text{ nm}$).

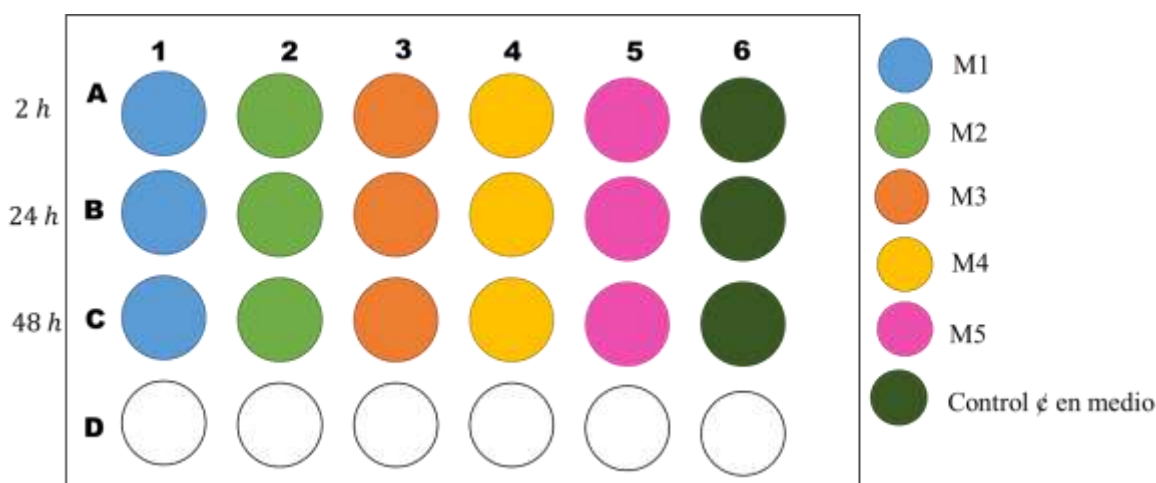


Figura 2. 6. Diagrama para los pozos para la generación de imagen celular.

2.5. Caracterización de los CQDs

2.5.1. Microscopía electrónica de barrido y transmisión

Se utilizó el equipo de emisión de campo FEI Nova Dual-beam SEM. Las imágenes de SEM se adquirieron en modo de electrones secundarios (SE), operando el microscopio a 25 kV y a una distancia de trabajo (WD) ~ 5 mm, utilizando el detector SE.

La solución de CQDs se dejó caer en una cinta doble cara de cobre para SEM, esperando la evaporación del disolvente utilizando una lámpara incandescente.

2.5.2. Microscopía electrónica de transmisión

Se utilizó el equipo FEI Titan 80-300 TEM. Las imágenes de TEM se adquirieron con el microscopio operando a 300 kV en modo de electrones de transmisión. Para caracterizar los CQDs se colocaron unas gotas de la suspensión en una rejilla de cobre para TEM, esperando la evaporación del disolvente utilizando una lámpara incandescente.

2.5.3. Difracción de rayos X

El equipo difractómetro Bruker D8 Discover. Se utilizó una fuente de radiación de $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, operado a 40 kV y 40 mA. Los patrones de difracción se obtuvieron de 10° a 70° para 2θ , con un tamaño de paso incremental de $0,03^\circ$.

Para su caracterización los CQDs se secaron en una parrilla a 120 °C hasta obtener polvos, los cuales se depositaron en los porta muestras para su estudio dentro del equipo.

2.5.4 Espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier-Raman

El equipo PerkinElmer FT-IR System Spectrum Gx. El análisis se realizó desde los 400 hasta los 4500 cm^{-1} buscando vibraciones y estiramientos moleculares correspondientes a grupos funcionales.

Para su caracterización la solución se colocó en una celda de cuarzo para la lectura del equipo.

2.5.5. Espectroscopia de absorción UV-Vis

El equipo ParkinElmer Lambda XLS. Para el análisis se realizó un barrido desde los 200 a los 900 nm.

Se pesaron 10 mg de material sólido los cuales se diluyeron en 3 ml de agua. La solución se llevó a baño ultrasónico por 10 minutos para dispersar las partículas en el medio acuoso. Dicha solución se depositó en la celdilla de cuarzo para la lectura en el equipo. Para los líquidos se realizó una dilución 1 a 20 ml de agua desionizada, de los cuales solo 3 ml se depositó dentro de la celdilla de cuarzo.

2.5.6 Espectroscopia de fotoluminiscencia

El equipo Cary EclipseFluorescence Spectrophotometer de Agilent Technologies. Las condiciones de lectura fueron tomando el máximo de excitación. Por reglas generales la técnica debe de iniciar ≈ 20 nm después del máximo de excitación y concluir al valor de multiplicar el máximo de excitación por dos y restarle 20 nm. Los valores de abertura (slit) tanto de emisión como excitación fueron de 20.

En fases sólidas se pesaron 10 mg de material el cual se diluyeron en 3 ml de agua. La solución se llevó a baño ultrasónico por 10 minutos para dispersar las partículas en el medio acuoso. Dicha solución se depositó en la celdilla de cuarzo para la lectura en el equipo. Para los líquidos solo se depositó la solución dentro de la celdilla de cuarzo.

2.6 Cálculos

2.6.1 Energía de banda prohibida

El cálculo de la energía de banda prohibida se realizó a partir de una transformada del espectro de absorción UV-Vis, obteniendo el diagrama de Tauc. Para obtener los valores del eje las abscisas (energía) se utiliza la ecuación 2.1.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \dots \text{(Ecuación 2. 1) Ecuación de Planck (energía)}$$

Donde E es la energía medida (eV), h es la constante de Planck (eV·s), c es la velocidad de la luz (nm/s) y λ es la longitud de onda de absorción, del cual se hizo un barrido desde los 200 hasta los 900 nm. Mientras que para el eje de las ordenadas se utiliza la expresión descrita en la ecuación 2.2.

$$(\alpha E)^{\frac{1}{n}} \quad \dots \text{(Ecuación 2. 2.)}$$

Donde α es la absorbancia obtenida en los espectros UV-Vis, E la energía previamente calculada, n es una constante la cual puede tener dos valores, 2 cuando el material es un semiconductor directo y 3 cuando es indirecto, los CQDs tienen un comportamiento indirecto.

Teniendo graficados los datos obtenidos se puede apreciar una pendiente, la cual con la ecuación de la recta y la intersección con el eje de la energía se dará el valor de E_g [309].

2.6.2 Rendimiento Cuántico

Para la determinación del rendimiento cuántico se utilizó la ecuación 2.3.

$$Q_D = Q_R \cdot \frac{I_D}{I_R} \cdot \frac{A_R}{A_D} \cdot \frac{\eta_D^2}{\eta_R^2} \quad \dots \text{(Ecuación 2. 3)}$$

Donde Q es el rendimiento cuántico, I en la intensidad de luminiscencia obtenida del espectro, A es la absorbancia de excitación y η es el índice de refracción del solvente utilizado; usando sulfato de quinina (rendimiento cuántico de %) en 0.1 M H₂SO₄ como

solución de referencia R; el subíndice D hace referencia a los CQDs por el inglés “Dots” [310].

2.6.3 Tamaño de cristalito

El tamaño de cristalito se calculó mediante la ecuación de Scherrer representada en la ecuación 2.4.

$$D = \frac{\kappa \lambda}{\beta \cos \theta} \dots (\text{Ecuación 2. 4.})$$

Donde “D” es el tamaño de cristalito en nanómetros, “k” es una constante con valor de 0.94, “λ” corresponde a la longitud de onda por parte de la radiación utilizada en el DRX, “β” es el ensanchamiento de los picos obtenidos en el difractograma y “θ” es la mitad del ángulo de Bragg (2θ) [311].



Capítulo 3.

Resultados

El presente capítulo se incluye los resultados obtenidos de las caracterizaciones estructurales, morfológicas y físicas-químicas, haciendo énfasis en las propiedades ópticas, además de las pruebas de citotoxicidad y generación de imágenes celulares de los materiales obtenidos.

“La vida es como montar en bicicleta; para mantener el equilibrio debes seguir moviéndote”

-Albert Einstein

3.1. Síntesis de CQDs

En esta sección se presentan los resultados y la discusión sobre la síntesis de CQDs a partir de diferentes precursores vegetales mediante el método hidrotermal. Se mantuvieron constantes las variables de síntesis: concentración del precursor en el medio acuoso (0.125 g/mL), temperatura (200 °C) y el tiempo de reacción (4 h), El objetivo fue analizar el mecanismo de formación de los CQDs considerando la presencia de compuestos característicos de las frutas, tales con moléculas como la fructuosa, la vitamina C y la pectina. Estos componentes favorecen la obteniendo una estructura base de los CQDs con algunas variaciones en su superficie y morfología atribuibles a la composición química y la heterogeneidad del proceso de formación.

3.1.1. Análisis químico y estructural

Microscopia electrónica de transmisión (TEM)

La morfología y distribución de tamaños de los CQDs se evaluaron mediante micrografías de MET (**Figura 3.1.**). En todos los casos se observaron nanopartículas de carbono bien dispersas, con morfologías predominantemente esféricas y cuasiesféricas.

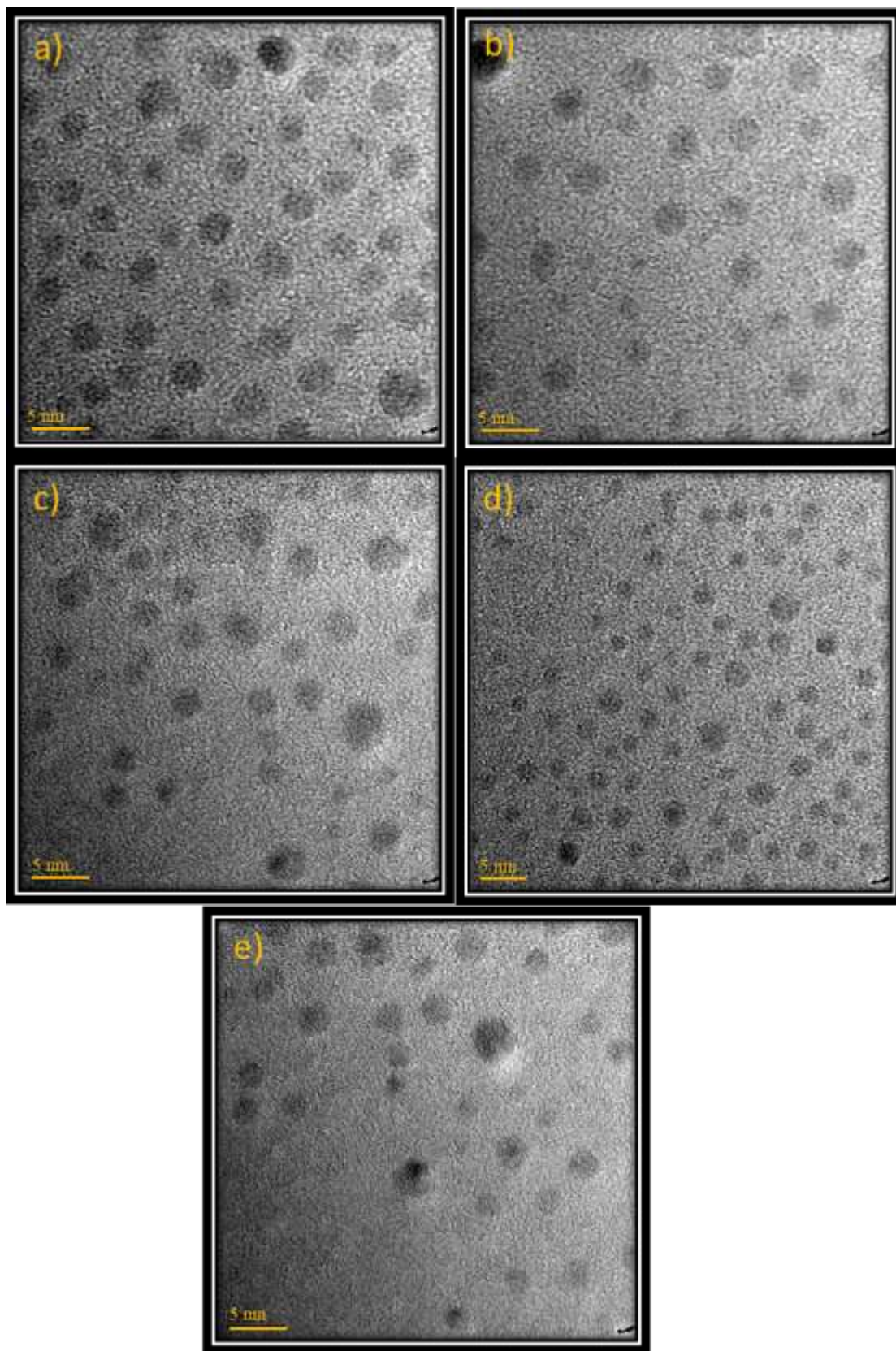


Figura 3. 1. Imágenes TEM de los CQDs a) durazno, b) fresa, c) guayaba, d) pera y e) plátano.

El análisis de distribución de tamaños se llevó a cabo con el software Imagen J a partir de aproximadamente 50 partículas por muestra. Los datos obtenidos se procesaron posteriormente en el software OriginLab para realizar un análisis estadístico y ajustar curvas de distribución (**Figura 3.2.**). Los resultados indican lo siguiente: Muestra a): presenta una distribución promedio a los 3 nm, con dispersión hacia 2 y 5 nm, además de una más alta a los 4 nm. La muestra b): exhibe diámetros promedios también en 3 nm con dispersión similar al durazno, aunque menos frecuentes en tamaños mayores. La muestra c): presenta una distribución centrada en 3 nm, con dispersiones de tamaños en 2 y 4 nm con mayor frecuencia en 4 nm. Por otro lado, la muestra d) demostró mayor frecuencia de diámetros en 2 y 3 nm con una dispersión en 4 nm. Por último, la muestra e) presenta una distribución promedio similar a la muestra de guayaba, pero con mayor dispersión a los 2 nm.

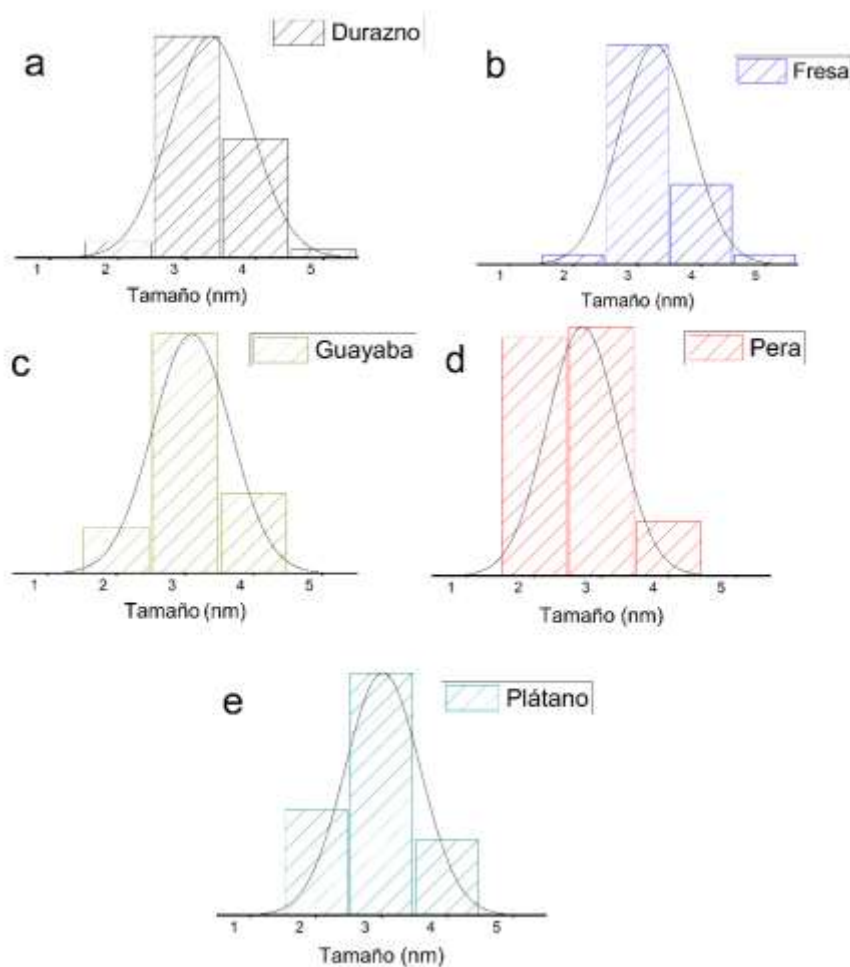


Figura 3. 2. Histograma de distribución de tamaño de los CQDs a) durazno, b) fresa, c) guayaba, d) pera y e) plátano.

Caracterización por DRX

La estructura de los CQDs se analizó mediante difracción de rayos X (DRX) (**Figura 3.3.**), identificando los picos característicos y comparándolos con el patrón estándar “PDF 00-046-0943 C Carbon”. En todas las muestras se observó un pico principal amplio entre 13.6° y 21° (2θ), correspondiente a la reflexión del plano (002), típico del óxido de grafeno. Adicionalmente, se detectó un pico secundario alrededor de 30.2° (2θ), asociado al plano (111), característico del proceso de grafitización de los CQDs. Estos resultados confirman que los materiales sintetizados presentan una estructura gráfica parcialmente oxidada, con distancias interplanares de aproximadamente 0.21 a 0.39 nm, cuyo incremento se atribuye a la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie.

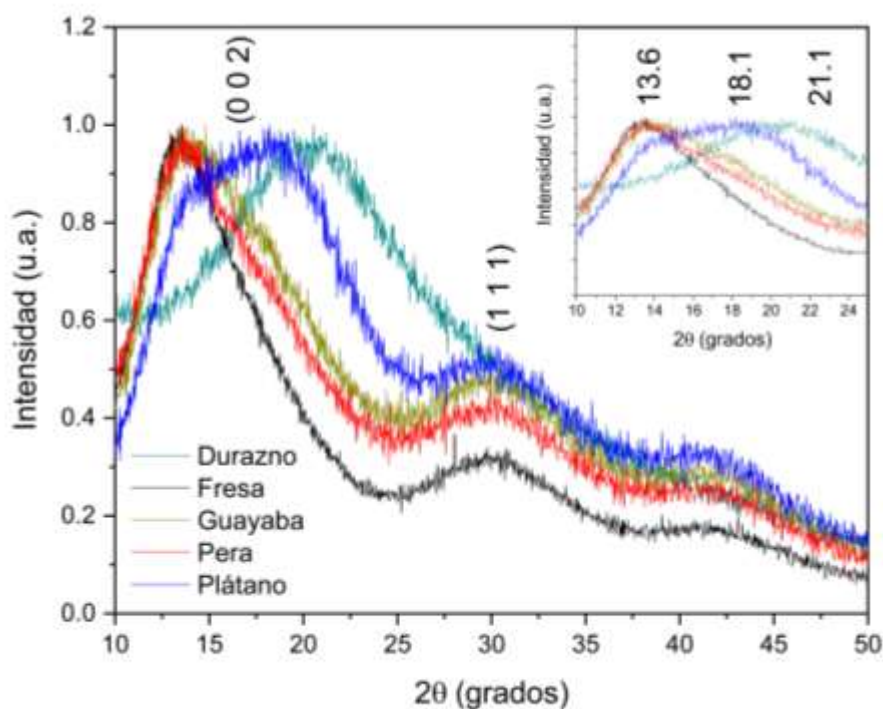


Figura 3. 3. Patrones de difracción de las diferentes muestras de CQDs.

Raman y FTIR

La caracterización estructural de los CQDs se complementó mediante espectroscopia Raman (**Figura 3.4.**). Los espectros correspondientes a las muestras obtenidas a partir de diferentes fuentes vegetales mostraron las bandas típicas de materiales carbonosos en torno a 1350 y 1445 cm^{-1} , asociadas a las bandas D y G, respectivamente. La primera se relaciona con

defectos estructurales y desorden en la red gráfitica, mientras que la segunda indica la presencia de dominios ordenados tipo grafeno. Asimismo, se observó una banda ancha entre 1600 y 1700 cm^{-1} atribuida a las vibraciones de estiramiento de los grupos C=O, lo que sugiere la existencia de especies oxigenadas en la superficie de los CQDs.

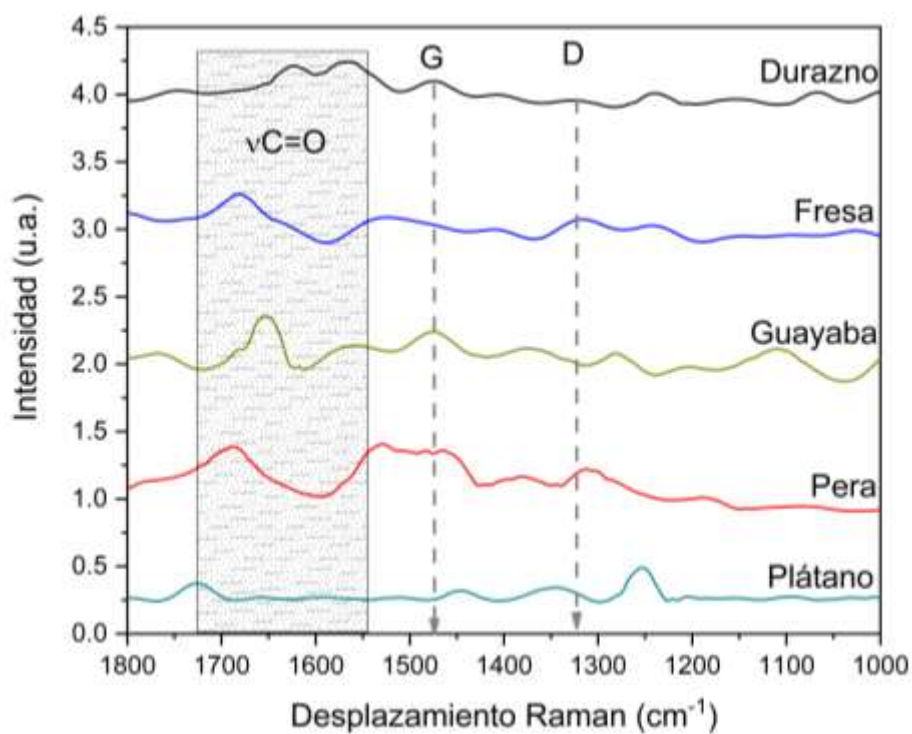


Figura 3. 4. Espectros Raman de las diferentes muestras de CQDs.

Con el fin de complementar el análisis Raman y confirmar la presencia de grupos funcionales en los CQDs, se realizó espectroscopia FTIR (**Figura 3.5.**). El espectro mostró una banda ancha alrededor de 3480 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de estiramiento de los grupos -OH , asociadas tanto a grupos hidroxilo superficiales como a la dispersión de los CQDs en medio acuoso. Además, se observó una banda en 1632 cm^{-1} correspondiente a los enlaces $\text{C}=\text{C}$ de estructuras aromáticas características de materiales carbonosos. Finalmente, la señal en 2090 cm^{-1} se relaciona con las vibraciones de estiramiento del grupo $\text{C}=\text{O}$, lo que evidencia una oxidación parcial en la superficie de los CQDs.

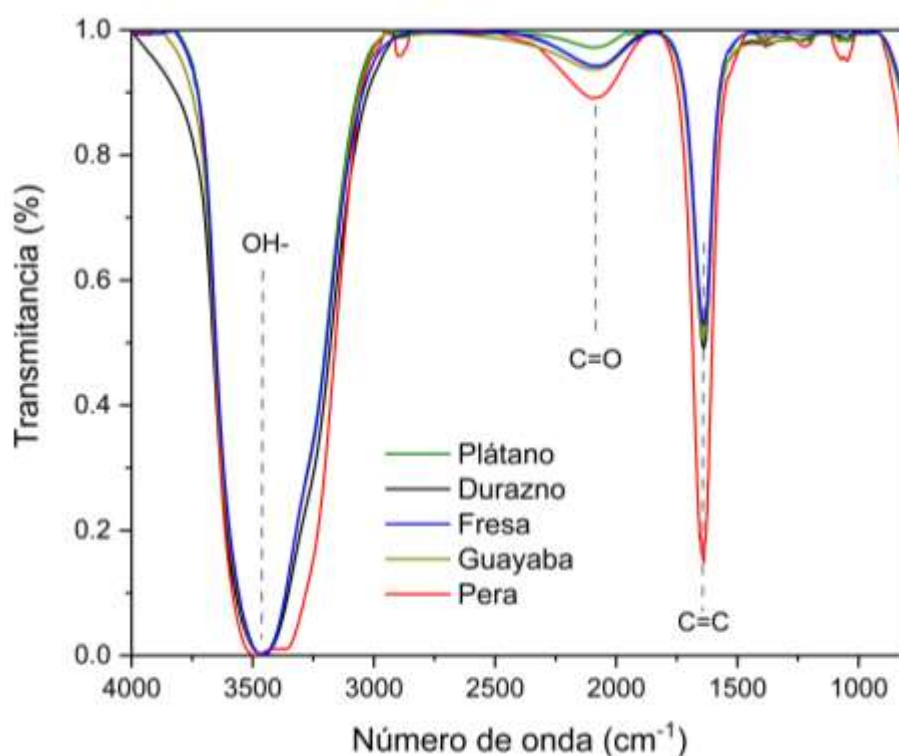


Figura 3. 5. Espectros FTIR de las diferentes muestras de los CQDs.

3.1.2. Mecanismo de formación de los CQDs

Hidrólisis de pectina

Los precursores contienen la fibra soluble pectina (molécula 1), que reacciona con el agua rompiendo el enlace o-glucosídico que enlaza las moléculas individuales que poseen cadenas con COOCH_3 (éster) y COOH (carboxilo). La pectina presenta una descomposición mediante la hidrólisis (**Figura 3.6.**).

El enlace o-glucosídico tiene 2 pares de electrones libres que usa para atacar un H del H₂O y desprotonarse liberando un OH⁻ y dejando un oxígeno cargado positivamente por no tener 2 pares de electrones libres que dan como resultado una carga formal positiva, esta será equilibrada a través de un electrón del carbono adyacente generando una ruptura heterolítica, dando la formación de (molécula 2) glucurónico de etilo (Etg). Por otro lado, el OH⁻ del ambiente será enlazado con el carbocatión de la ruptura heterolítica generando (molécula 3) ácido metilglucopiranosidurónico (MgA).

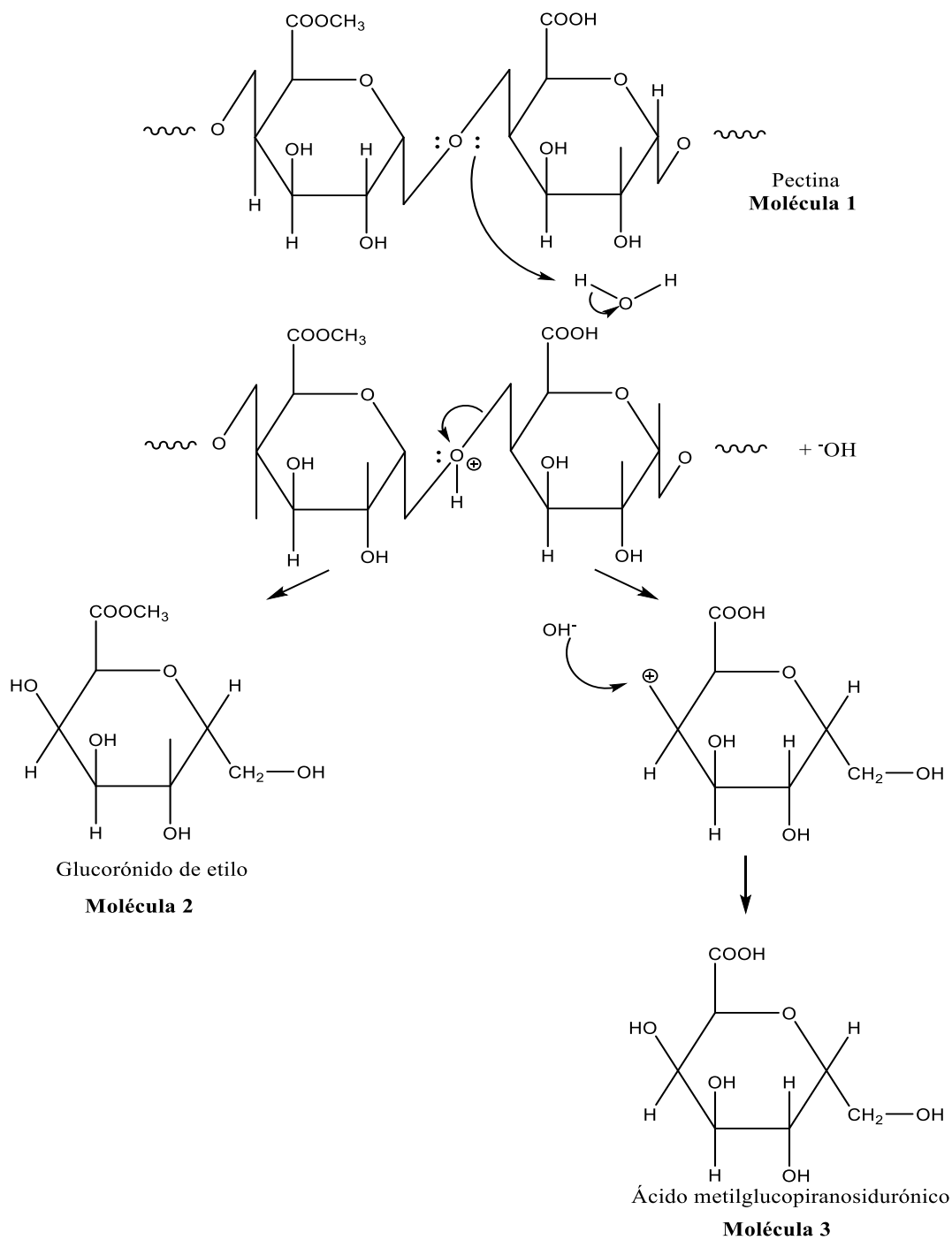


Figura 3. 6. Mecanismo de hidrolisis de la pectina para la formación de los CQDs.

Oxidación de Vitamina C

Los precursores contienen ácido ascórbico (molécula 4). La molécula presenta una descomposición mediante oxidación (**Figura 3.7.**) que ocurre por acción del oxígeno molecular en el ambiente que por efecto de la temperatura es un agente oxidante capaz de

llevar a cabo rupturas homolíticas, dando lugar a reacciones radicalarias (que generan radicales libres-media flecha). El agente oxidante genera la pérdida de un electrón en la Vitamina C que es termoestable, lo que resulta en el radical semidehidroascórbico, continuando con la oxidación se dará lugar a la formación de peróxido (H_2O_2) y radicales de oxígeno, posterior a esto la lactona (estructuración forma de anillo) buscará su equilibrio desplazando los electrones desapareados para generar dobles enlaces y de esta forma (molécula 5) el ácido dehidroascórbico (DHA).

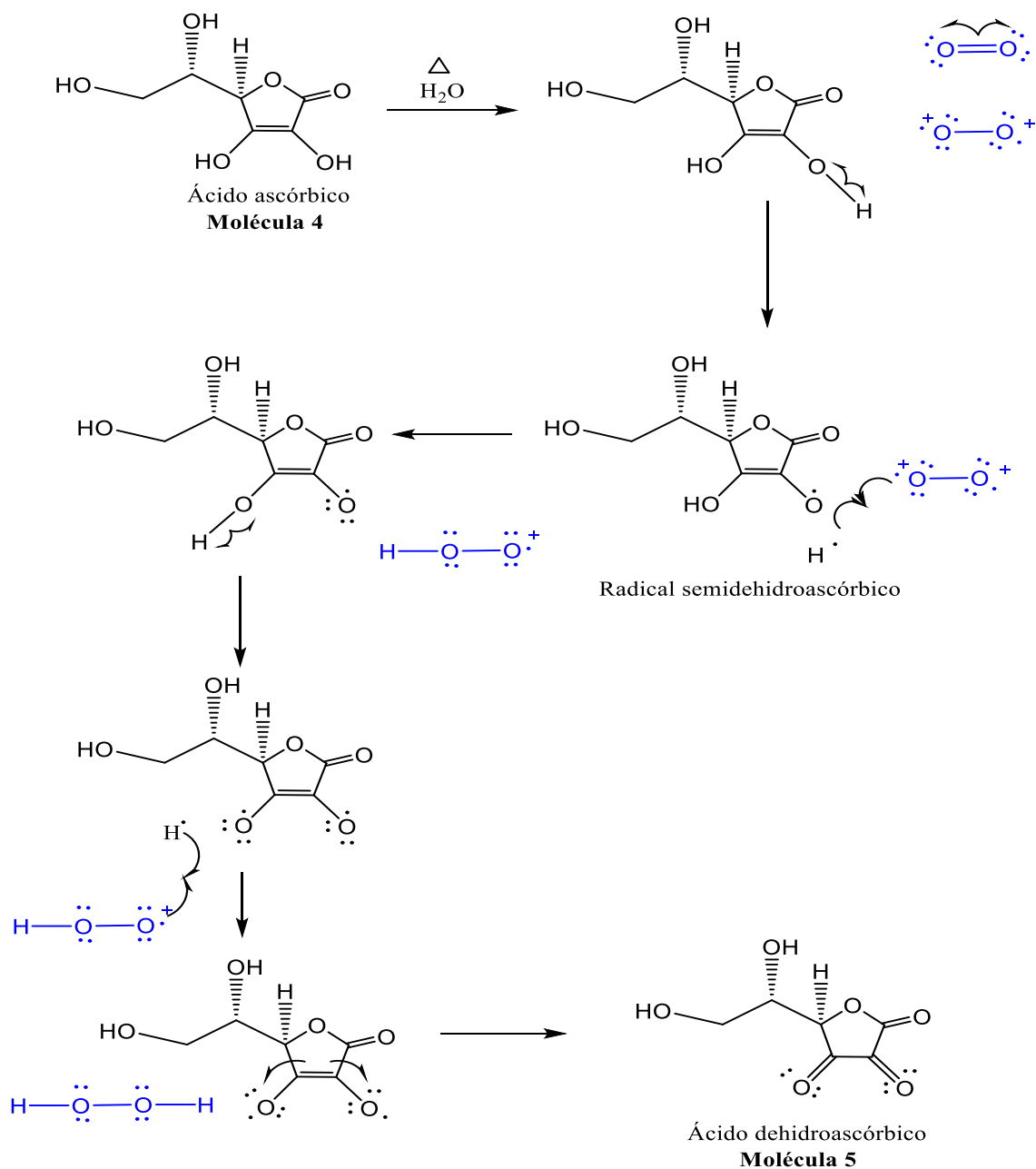


Figura 3. 7. Mecanismo de oxidación de vitamina C para la formación de los QCDs.

Deshidratación de fructosa

Los precursores contienen moléculas de fructosa (molécula 6) y tomando en cuenta que la descomposición de azúcares por deshidratación (**Figura 3.8.**) es favorable en medios ácidos (como es el DHA) y a elevadas temperaturas. El proceso se lleva a cabo dentro de la misma molécula donde el etanol (CH_2OH) de la molécula pierde un H^+ por acción del OH^-

adyacente, de esta desprotonación se desprende agua, quedando un carbocatión en el anillo y un carbanión en el enlace de etanol, como resultado el anillo buscará equilibrar las cargas y formará un doble enlace con un grupo OH-, este grupo se enlazará con el OH- adyacente por atracción electrostática y de este enlace se desprende agua dejando un carbocatión que equilibrará su carga con los electrones π del doble enlace formado anteriormente, el proceso de deshidratación se repite para el grupo OH- restante dando como resultado (molécula 7) Hidroximetilfurfural (HMF).

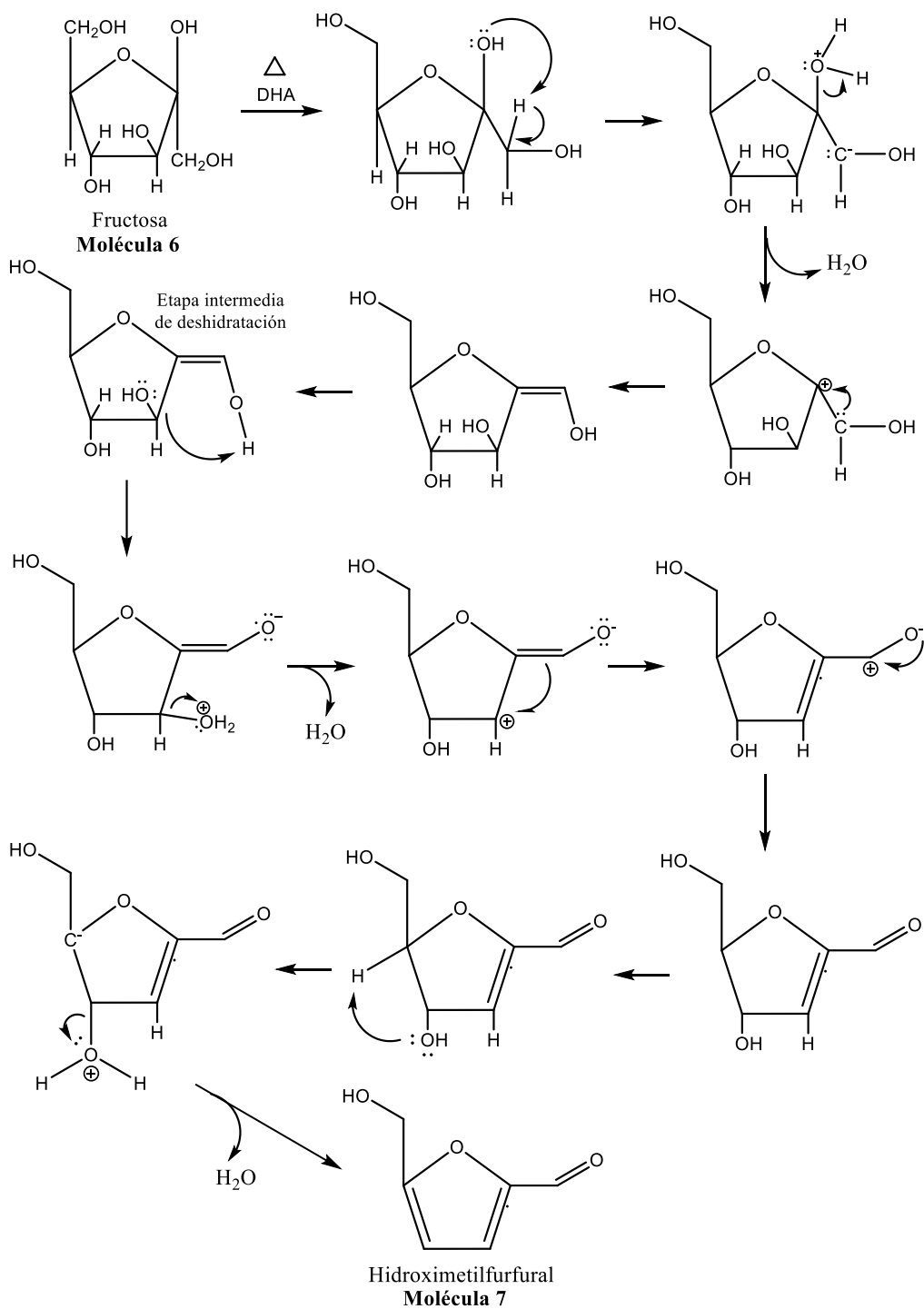


Figura 3. 8. Mecanismo de deshidratación de fructosa para la formación de los CQDs.

Polimerización por condensación de alcoholes para formar éteres

Con los subproductos de la descomposición de moléculas del precursor en el tratamiento hidrotermal se propone la presencia e interacción de estas moléculas mediante la siguiente relación de polimerización (**Figura 3.9.**):

El proceso de condensación inicia con la desprotonación de la molécula de DHA por acción del grupo OH^- del EtG lo que dará lugar a la formación de H_2O con carga formal positiva y su posterior desprendimiento dejando un carbocatión en la estructura de EtG disponible para formar un enlace por fuerzas electrostáticas con la molécula de HMF a través de un enlace glucosídico (éter) en esta interacción actúa simultáneamente el DHA para la desprotonación del HMF. El alcohol secundario del primer producto intermediario lleva a cabo una desprotonación del alcohol primario del HMF en el medio, de esta reacción se desprende HMF con un oxígeno deficiente (O^-) hacia el ambiente, así como H_2O del primer producto intermediario que en conjunto con las condiciones del sistema y la unión de dos monómeros; clasifica la reacción como polimerización, de esta etapa se obtiene un carbocatión que por fuerzas electrostáticas se enlaza con el DHA disponible en el medio a través de un segundo enlace glucosídico (éter) de este enlace se desprende un H^+ que se enlaza con el HMF permitiéndole recuperar su alcohol primario, al tener un proceso de crecimiento a través de adición y desprendimiento de alcoholes la reacción de polimerización se subclasifica como condensación de alcoholes.

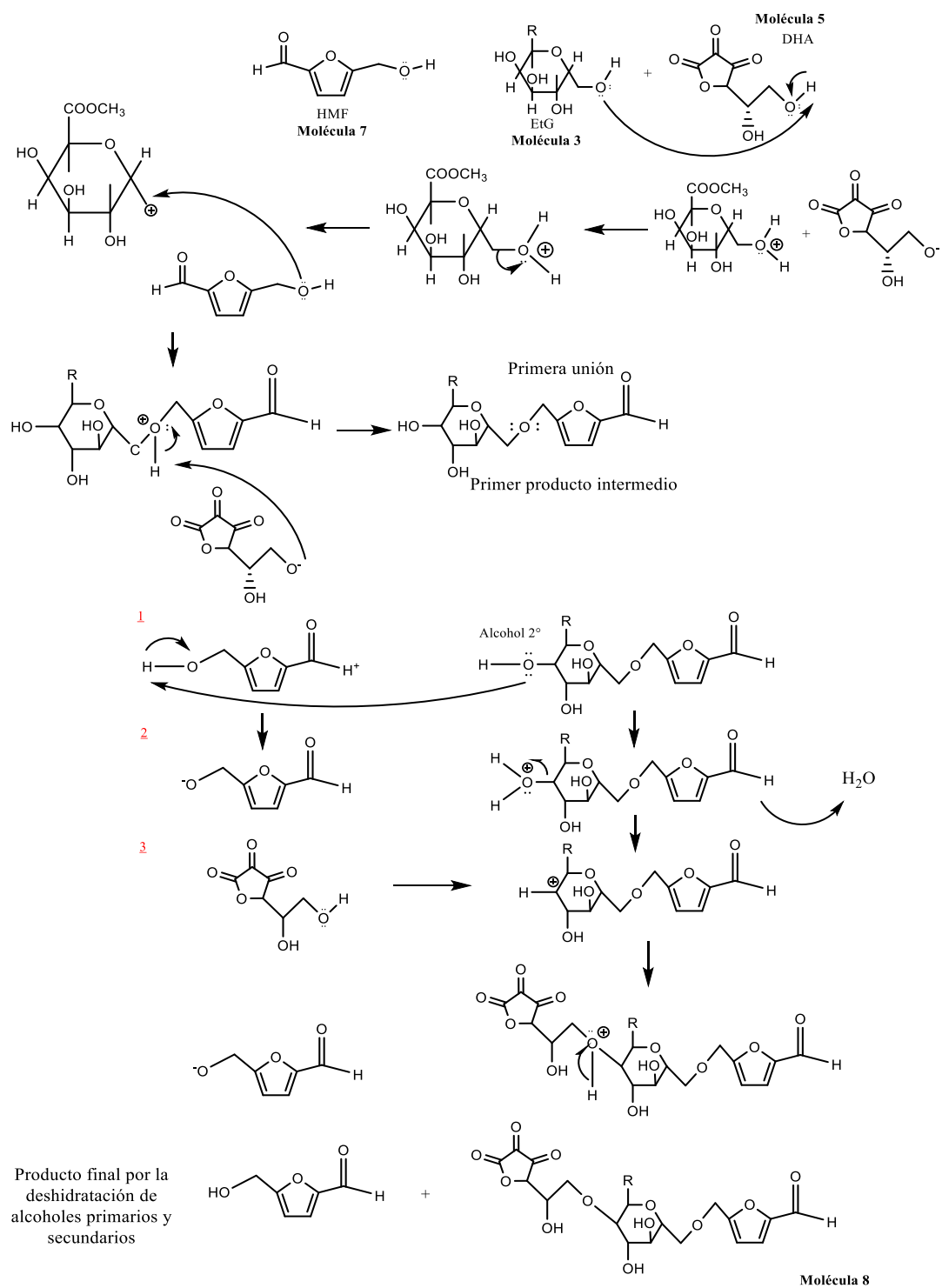


Figura 3. 9. Mecanismo de polimerización por condensación de alcoholes para formar éteres previos a los CQDs.

Posible nucleación y formación de los CQDs

El último paso y que da forma a los CQDs es la nucleación, donde la cadena polimérica formada anteriormente se comienza a estructurar en forma de láminas de óxido de grafeno y grafeno (**Figura 3.10.**) dando como resultado CQDs esféricos o semiesféricos con una estructura semi cristalina de núcleos grafíticos o amorfos con hibridaciones sp^2 y sp^3 donde se origina el proceso de transición electrónica lo que causa la emisión ($\pi-\pi^*$) en los CQDs. En la superficie se encontrarán grupos funcionales oxigenados como hidroxilos (OH-), carbonilo y carboxilo (C=O).

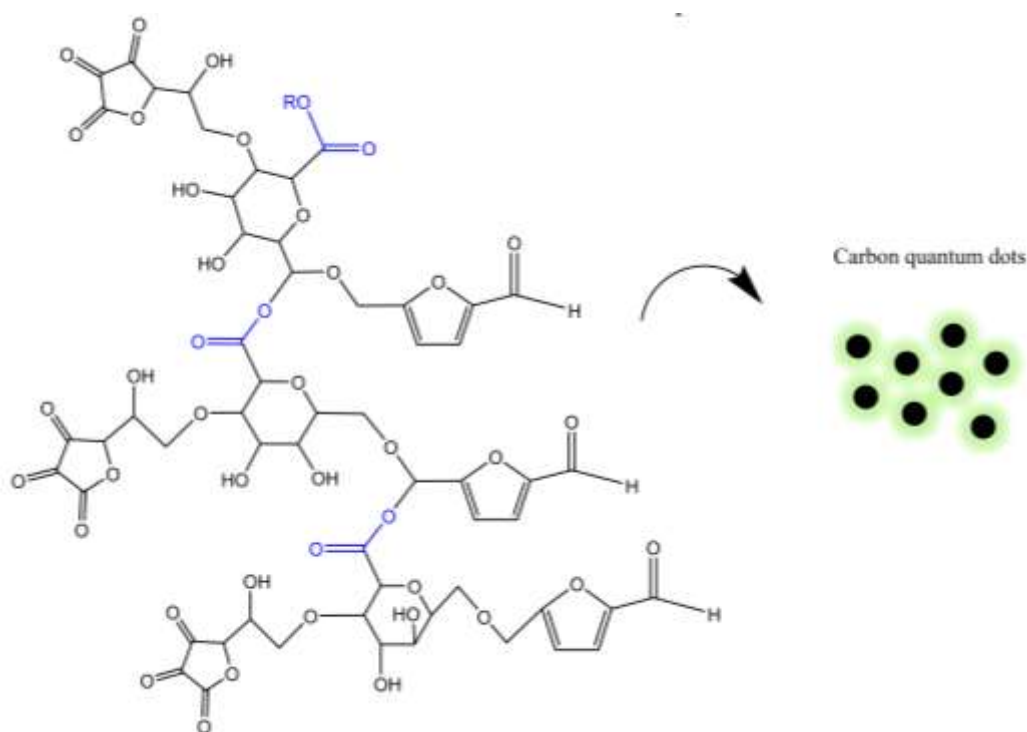


Figura 3. 10. Mecanismo de posible nucleación y formación de los CQDs.

3.1.3. Propiedades ópticas

Absorción y energía de banda prohibida

Se realizó espectroscopia de absorción UV-Vis a las muestras de CQDs, obteniéndose los espectros correspondientes (**Figura 3.11.**). En todos los casos se observó una banda intensa alrededor de 280 nm, atribuida a transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ asociadas a los enlaces C=C presentes en los dominios aromáticos de los CQDs. Asimismo, se identificó una segunda banda alrededor de 300 nm que se extiende hacia la región visible, relacionada con

transiciones $n-\pi^*$ originadas por grupos carbonilo ($C=O$) en la superficie de las nanopartículas. Entre las muestras analizadas, los CQDs obtenidos a partir de durazno mostraron la mayor intensidad de absorción, mientras que los derivados de pera y plátano presentaron valores menores.

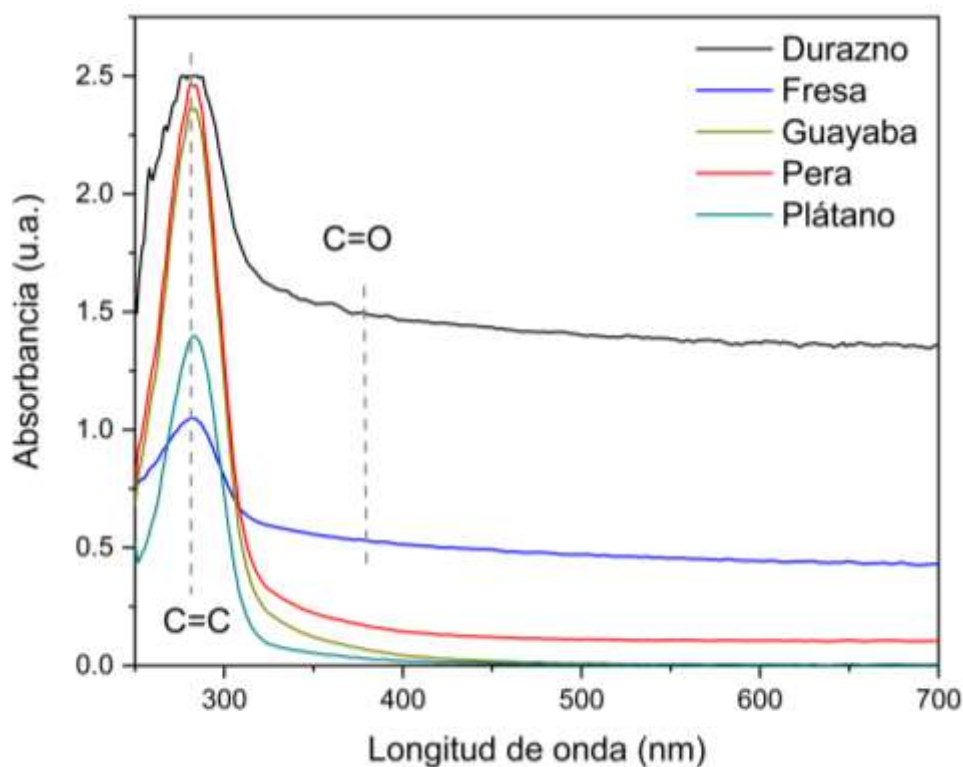


Figura 3. 11. Espectros de absorción UV-Vis de las diferentes muestras de CQDs.

Para la estimación del band gap de los CQDs se realizó los gráficos de Tauc (**Figura 3. 12.**), los cuales se obtuvieron extrapolando la región lineal de las funciones $(\alpha h\nu)^{1/n}$ para el eje de las ordenadas y $h\nu$ para el eje de las abscisas. Se observan diferentes valores dependiendo el precursor: 2.72 eV para el durazno, 2.96 eV para la fresa, 3.71, 3.74 y 3.78 eV para las muestras de pera, guayaba y plátano respectivamente.

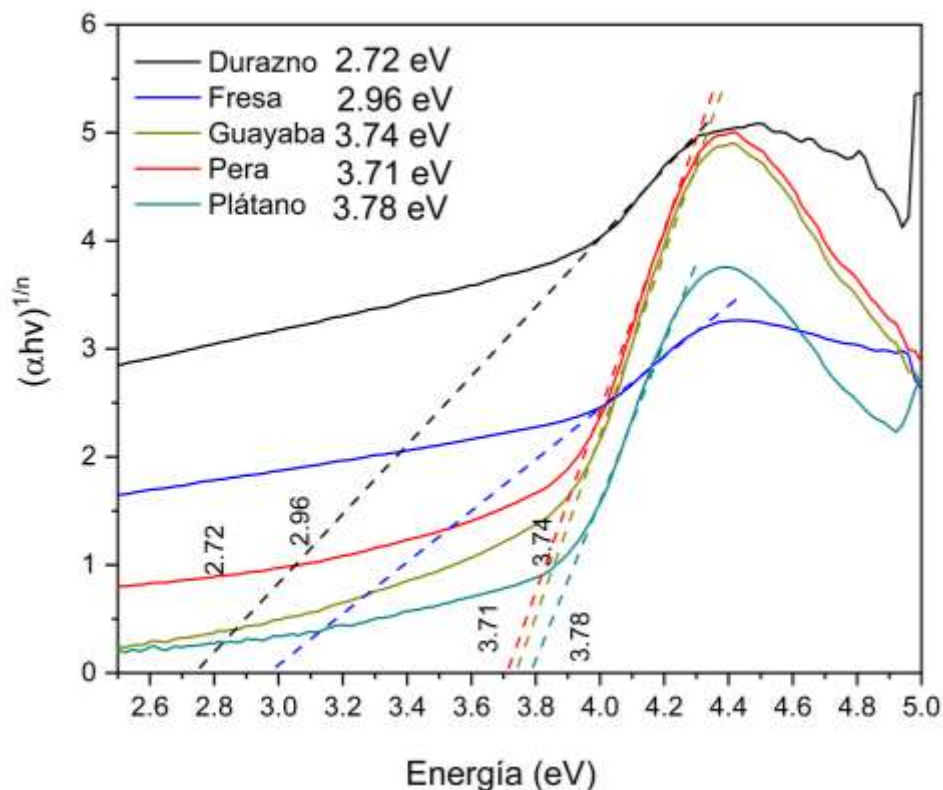


Figura 3. 12. Gráfico de Tauc para el cálculo de la banda prohibida en las muestras de CQDs.

Fotoluminiscencia

Para determinar las propiedades ópticas los CQDs relacionadas con el efecto de phototuning, se registraron espectros de fotoluminiscencia a diferentes longitudes de onda de excitación (**Figura 3.13.**), variando desde los 360 hasta los 480 nm con incrementos de 20 nm. Los resultados muestran un claro desplazamiento batocrómico conforme aumenta la longitud de onda de excitación, con emisiones localizadas en el intervalo de 480 a 550 nm. Este comportamiento es característico de los CQDs y se atribuye a los estados electrónicos superficiales generados por los grupos funcionales oxigenados, los cuales inducen transiciones dependientes de la energía de excitación. Se observa que la intensidad máxima de emisión se alcanza a de excitación de 460 nm, evidenciando una tendencia de desplazamiento hacia longitudes de onda más largas conforme incrementa la energía de excitación. Además, el mapa de emisión permite visualizar con mayor claridad los cambios en el color de luminiscencia, registrándose máximos en las regiones correspondientes al azul-cian y verde. Las curvas de emisión presentan un perfil estrecho y bien definido cubriendo

un rango espectral desde el violeta hasta el rojo, lo cual resalta la versatilidad óptica de los CQDs sintetizados.

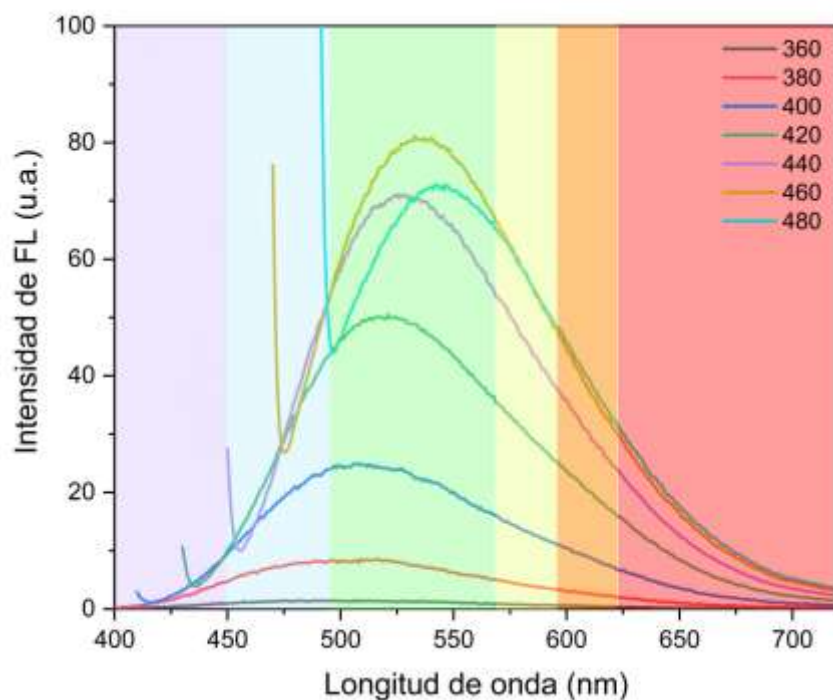


Figura 3. 13. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación en los CQDs para la determinación de sus propiedades de phototuning.

Determinando la longitud de onda de excitación se registraron los espectros de fotoluminiscencia (FL) de todas las muestras de CQDs (**Figura 3.14.**). Se observa una emisión máxima a 508 para la muestra obtenida a partir de durazno y a 528 nm para las demás muestra, las cuales presentan menores intensidades en el siguiente orden: fresa, pera, guayaba y plátano.

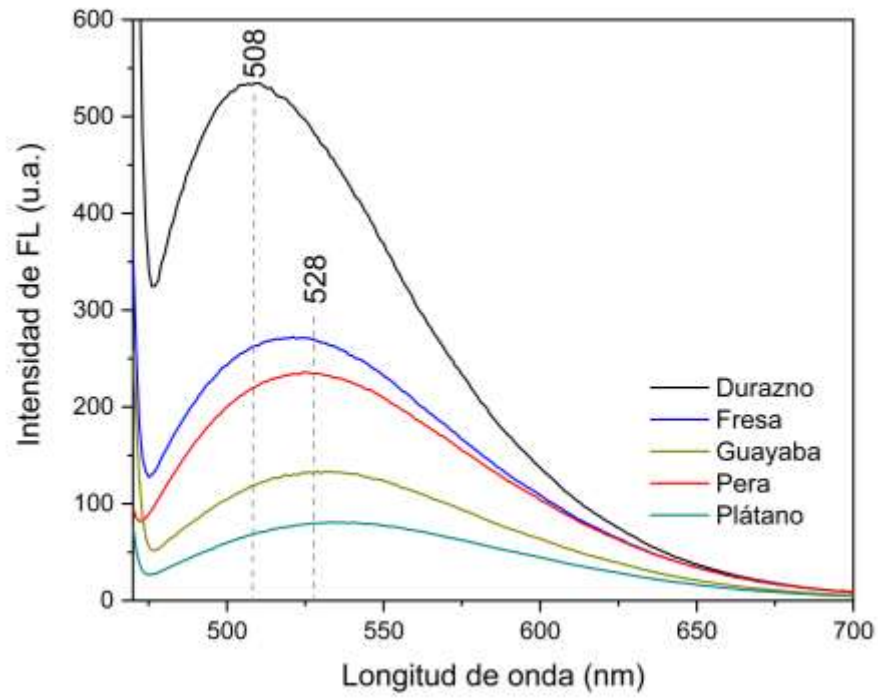


Figura 3. 14. Espectros de fotoluminiscencia en todas las muestras de CQDs a una longitud de onda de excitación de 460 nm.

3.2. CQDs PEGilados

En este apartado se presentan los resultados y la discusión correspondientes a la síntesis de puntos cuánticos de carbono (CQDs) obtenidos a partir de piña (*Ananas comosus*) mediante el método hidrotermal, manteniendo constantes las condiciones de reacción respecto al experimento previo. Los CQDs fueron modificados superficialmente con polietilenglicol (PEG) en diferentes concentraciones (0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 g), empleando un pH de 3.4 en una primera serie de experimentos. De forma paralela, se realizó una segunda serie en la que se varió el pH (2, 4, 8 y 11) mediante el ajuste con H_2SO_4 y NaOH , manteniendo fija la concentración de PEG (0.75 g). El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la modificación superficial con PEG sobre las propiedades ópticas de los CQDs, con miras a su aplicación potencial en el campo biomédico.

3.2.1. Análisis químico y estructural

TEM

La morfología y distribución de tamaño de los CQDs y PEG-CQDs obtenidos bajo distintas condiciones de modificación superficial se presentan en las micrografías TEM (**Figura 3.15**). En la muestra a) se observan CQDs con morfología esférica bien definida, tamaños en el rango de 2 a 5 nm y buena dispersión. En la muestra b), con una incorporación mínima de PEG, los PEG-CQDs comienzan a mostrar una ligera envoltura amorfa, indicativa de una cobertura superficial parcial por el polímero. Al incrementar la concentración de PEG hasta 1 g (muestra c), la morfología se vuelve predominantemente amorfa, con regiones de alta densidad, lo que sugiere una cobertura excesiva e incluso la posible formación de una matriz polimérica continua. En condiciones ácidas (muestra d), los PEG-CQDs presentan agregados densos con algunas partículas discernibles dentro de la matriz del polímero. Por otro lado, en condiciones básicas (muestra e), se observa una mejor dispersión y definición morfológica; este comportamiento podría atribuirse a los efectos de protonación y desprotonación, que influyen en la interacción y cobertura del PEG sobre la superficie de los CQDs.

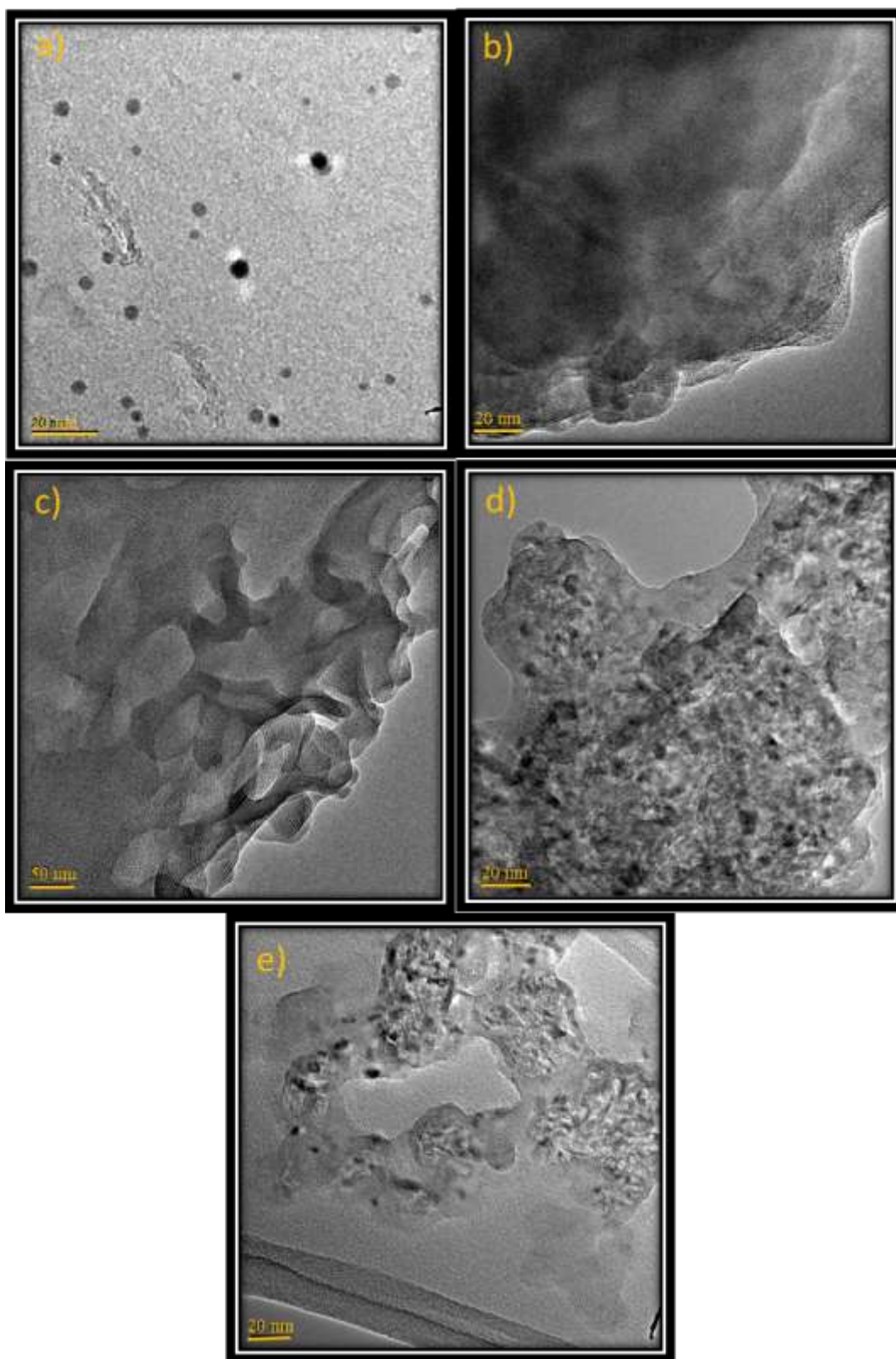


Figura 3. 15. Imágenes TEM de los CQDs con a) 0 g, b) 0.25 g, c) 1 g de PEG y al cambio de pH d) medio ácido (pH 2) y e) en medio básico (pH 8) con 0.5 g de PEG en ambas muestras.

El conteo de partículas se realizó de manera análoga al caso anterior. No obstante, en las muestras de PEG-CQDs la medición y el análisis estadístico del tamaño resultaron más complejos debido a la presencia de la matriz polimérica. Para los CQDs, se efectuaron aproximadamente 30 mediciones individuales (**Figura 3.16**), obteniéndose una distribución de tamaños entre 1 y 5 nm, con una frecuencia predominante alrededor de los 4 nm.

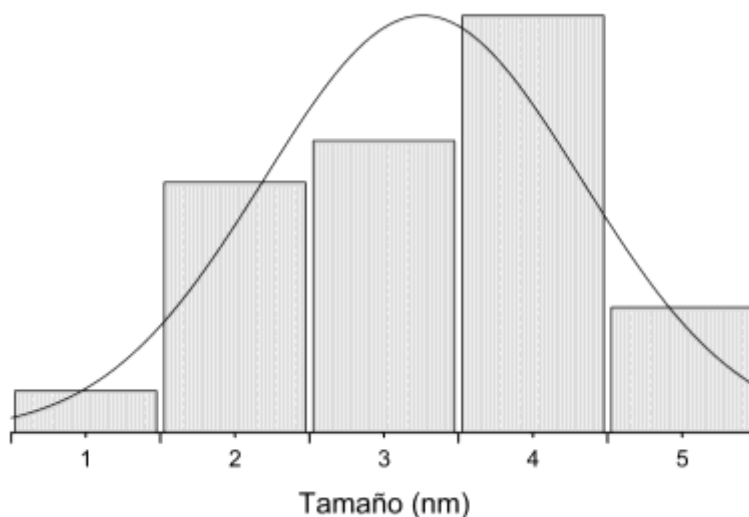


Figura 3. 16. Histograma de distribución de tamaño de los CQDs sin presencia de PEG.

FTIR

Para identificar las vibraciones moleculares de los grupos orgánicos presentes en los CQDs y PEG-CQDs, así como para analizar la posible interacción entre las nanopartículas y el polímero, se realizaron espectros de FTIR (**Figura 3.17**). En el panel a) se muestran los espectros de los CQDs modificados con diferentes concentraciones de PEG manteniendo un pH constante, mientras que en b) se presentan los espectros obtenidos al variar el pH en los PEG-CQDs. En ambos casos se observan las bandas características de los CQDs: una banda ancha centrada alrededor de 3425 cm^{-1} y otra a 1665 cm^{-1} , atribuidas a las vibraciones de los grupos -OH y a los enlaces $\text{C}=\text{C}$ con hibridación sp^2 de carácter aromático, respectivamente.

Los CQDs sin modificación con PEG presentan señales a 2100 y 740 cm^{-1} , correspondientes a los grupos C-O y C-H . Con la incorporación del PEG aparecen nuevas bandas a 2947 , 1780 , 1120 y 650 cm^{-1} , asociadas a las vibraciones de los grupos C-H , C=O , C-O-C y C-H , respectivamente, características del polímero. En el caso b), se observa un incremento en

la intensidad y el ensanchamiento de la banda correspondiente al grupo -OH conforme el pH aumenta, lo que sugiere una mayor interacción con el medio básico.

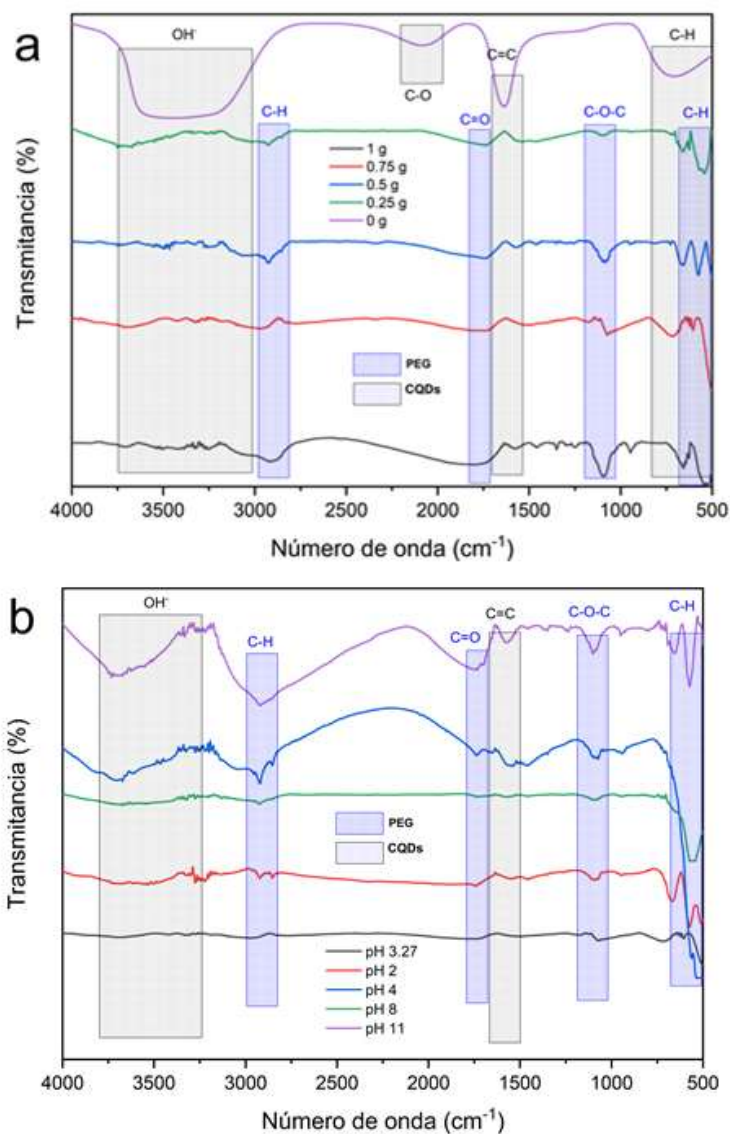


Figura 3. 17. Espectros FTIR a) para el cambio de masa de PEG en los CQDS y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.

3.2.2. Formación y modificación superficial

La piña (*Ananas comosus*), fruto perteneciente a la familia de las bromeliáceas, se empleó como fuente precursora para la síntesis de los CQDs y PEG-CQDs debido a su alto contenido de agua, carbohidratos (principalmente fructosa), fibras (como la pectina) y vitamina C. La formación de los CQDs se llevó a cabo mediante una reacción hidrotérmal (**Figura 3.18**),

durante la cual la biomasa se transforma en nanopartículas de carbono a través de tres etapas principales [30]. En la primera, las macromoléculas orgánicas sufren transformaciones químicas por hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, oxidación, aromatización y recondensación, dando lugar a moléculas más simples [312], [313]. En la segunda etapa, estas moléculas reaccionan entre sí mediante procesos de condensación y polimerización, promoviendo la formación de pequeños núcleos o *clusters* de carbono. Finalmente, en la tercera etapa ocurre la nucleación y crecimiento de partículas amorfas o semiamorfas con dominios gráficos que presentan hibridaciones sp^2 y sp^3 [12].

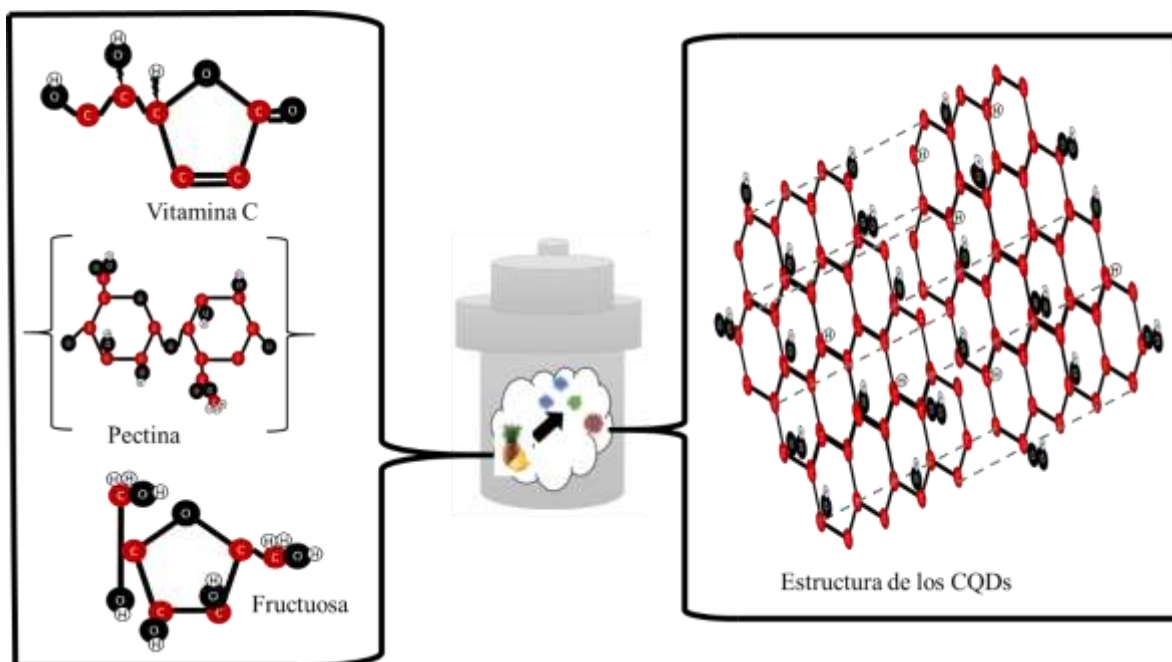


Figura 3. 18. Síntesis y formación de los CQDs por hidrotermal.

La modificación superficial de los PEG-CQDs (**Figura 3.19**) se llevó a cabo mediante dos tipos principales de interacciones entre las partículas y el polímero. Por un lado, se establecieron enlaces covalentes a través de reacciones de esterificación entre los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) del PEG y los grupos funcionales $\text{C}-\text{O}$ o $\text{C}-\text{H}$ presentes en la superficie de los CQDs. Por otro lado, se presentaron interacciones no covalentes, tales como fuerzas de Van der Waals y fuerzas electrostáticas, inducidas por los procesos de protonación y desprotonación de la superficie de los CQDs bajo diferentes condiciones de pH.

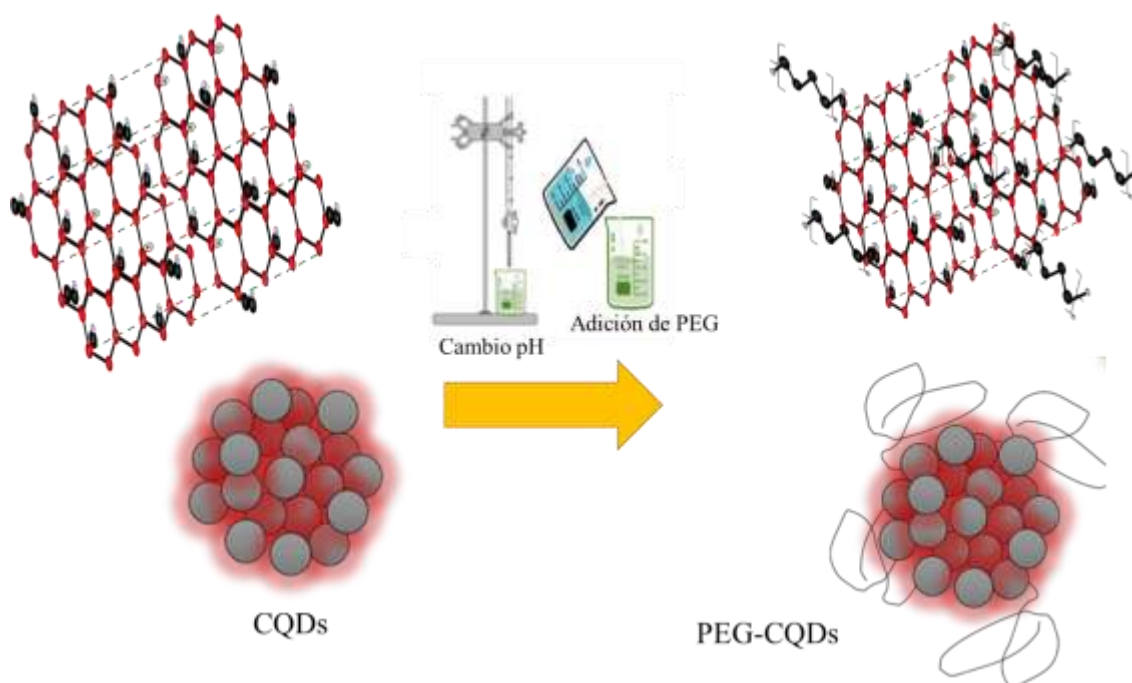


Figura 3. 19. Recubrimiento superficial de los CQDs con PEG.

3.2.3. Propiedades ópticas

Absorción y energía de banda prohibida

Se obtuvieron los espectros de absorbancia de los CQDs y PEG-CQDs (**Figura 3.20**). En la gráfica a) se presentan los espectros correspondientes a la variación en la cantidad de polímero incorporado, mientras que en b) se muestran los resultados para las diferentes condiciones de pH empleadas durante la modificación superficial. En todos los casos se observaron bandas de absorción características alrededor de 227 nm, asociadas a transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ de los enlaces $\text{C}=\text{C}$, y una segunda banda cercana a 285 nm, correspondiente a transiciones $n-\pi^*$ de los grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) presentes en la estructura y superficie de los CQDs. En las muestras sin PEG, la absorción se mantiene constante más

allá de los 300 nm, mientras que en las muestras modificadas con el polímero dicha absorbancia disminuye notablemente, indicando un posible efecto de recubrimiento del PEG sobre los centros ópticamente activos de los CQDs.

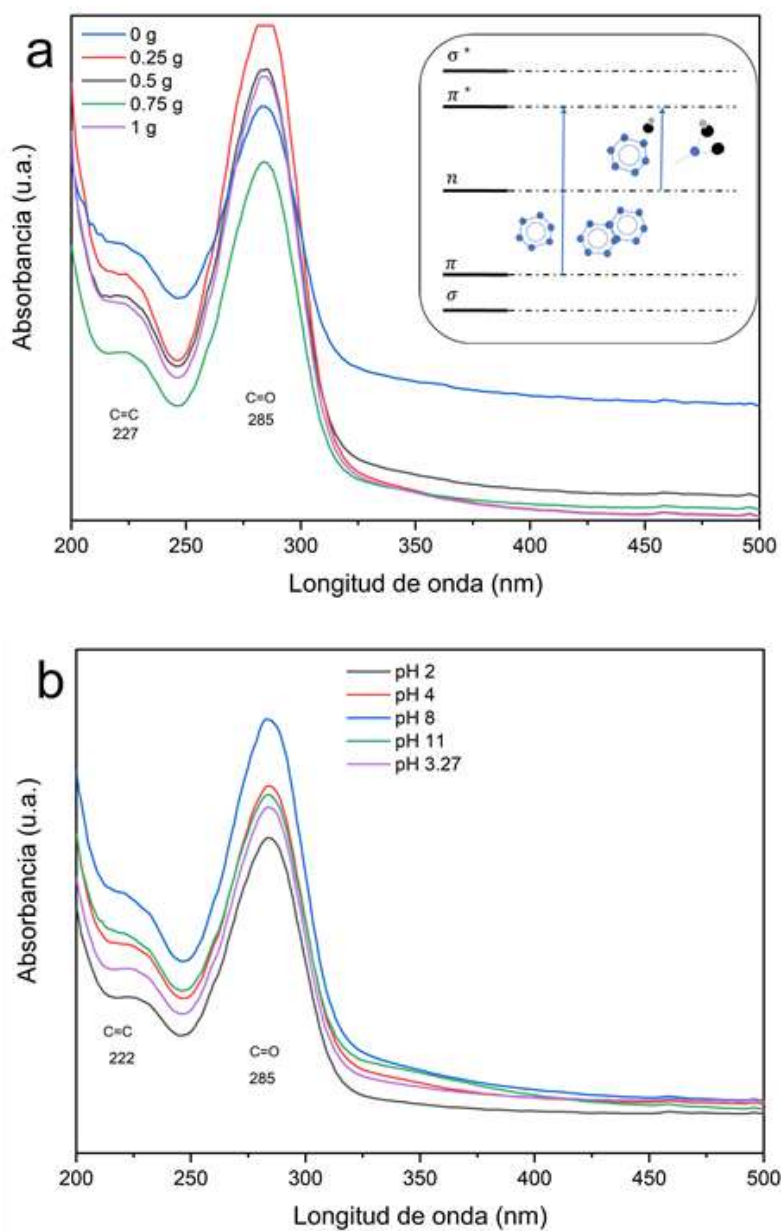


Figura 3. 20. Espectros UV a) para el cambio de masa de PEG en los CQDS y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.

A partir de los valores de absorbancia se determinó la E_g de los CQDs y PEG-CQDs de los CQDs y PEG-CQDs mediante los gráficos de Tauc (**Figura 3.21**). En la gráfica a) se presentan los resultados obtenidos al variar la concentración de PEG durante la síntesis,

mientras que en b) se muestran los correspondientes a los cambios de pH. En el primer caso, se observa que la E_g disminuye conforme aumenta la cantidad de PEG, pasando de 3.71 eV en los CQDs sin modificar a 3.32 eV en las muestras con mayor contenido del polímero. Este comportamiento sugiere que el PEG podría inducir una ligera alteración en la estructura electrónica de los CQDs, posiblemente por pasivación superficial o generación de nuevos niveles energéticos asociados al recubrimiento. En cuanto a la variación de pH, se registró un cambio menos significativo, con un valor máximo de 3.78 eV, lo que indica que las condiciones ácido-base influyen de forma limitada en la estructura electrónica de los PEG-CQDs.

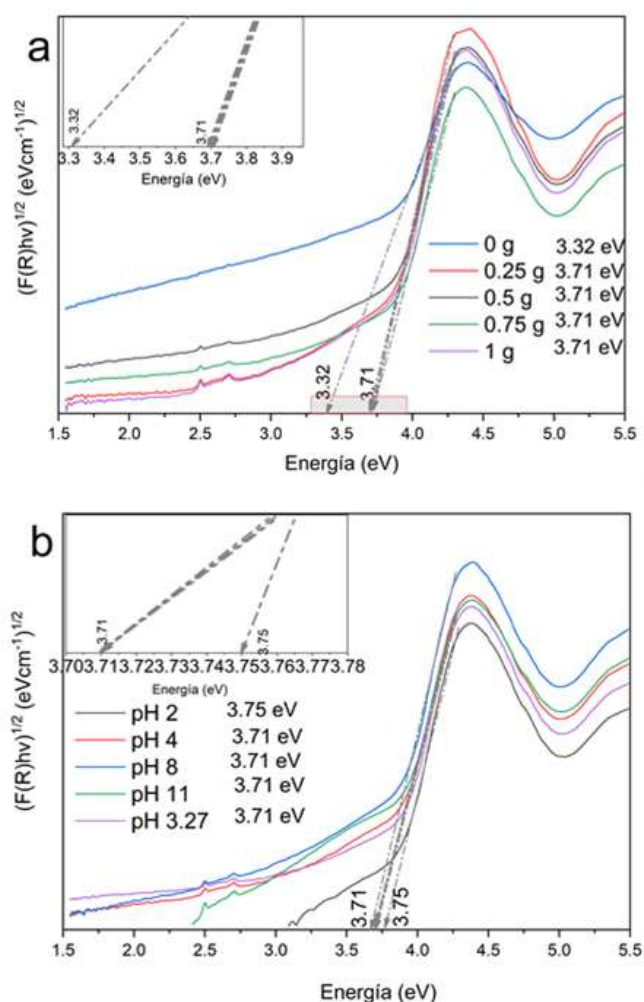


Figura 3. 21. Gráfico de Tauc para el cálculo de la banda prohibida a) para el cambio de masa de PEG en los CQDS y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.

Fotoluminiscencia

Para evaluar el efecto del *fototuning* en los CQDs y PEG-CQDs se registraron espectros de emisión de fotoluminiscencia a diferentes longitudes de onda de excitación (**Figura 3.22**). En el caso de los CQDs, las excitaciones se realizaron desde 280 hasta 440 nm, mientras que para los PEG-CQDs se extendieron de 280 a 480 nm, con incrementos de 20 nm. En ambos sistemas se observó un desplazamiento progresivo del máximo de emisión hacia longitudes de onda mayores conforme aumentó la energía de excitación, comportamiento característico de la emisión sintonizable propia de los CQDs.

Los espectros de los CQDs (a) muestran emisiones en el rango de 280 a 480 nm, con intensidades dominantes en las regiones violeta, azul y verde del espectro visible. Por su parte, los PEG-CQDs (b) exhiben un comportamiento similar, aunque con una extensión de la emisión hasta aproximadamente 480 nm, lo que indica un desplazamiento adicional hacia las regiones azul, verde y amarilla. En ambos casos, la máxima intensidad de emisión se registró a una excitación de 380 nm, lo que sugiere una influencia del PEG sobre los estados de superficie y los centros emisores de los CQDs.

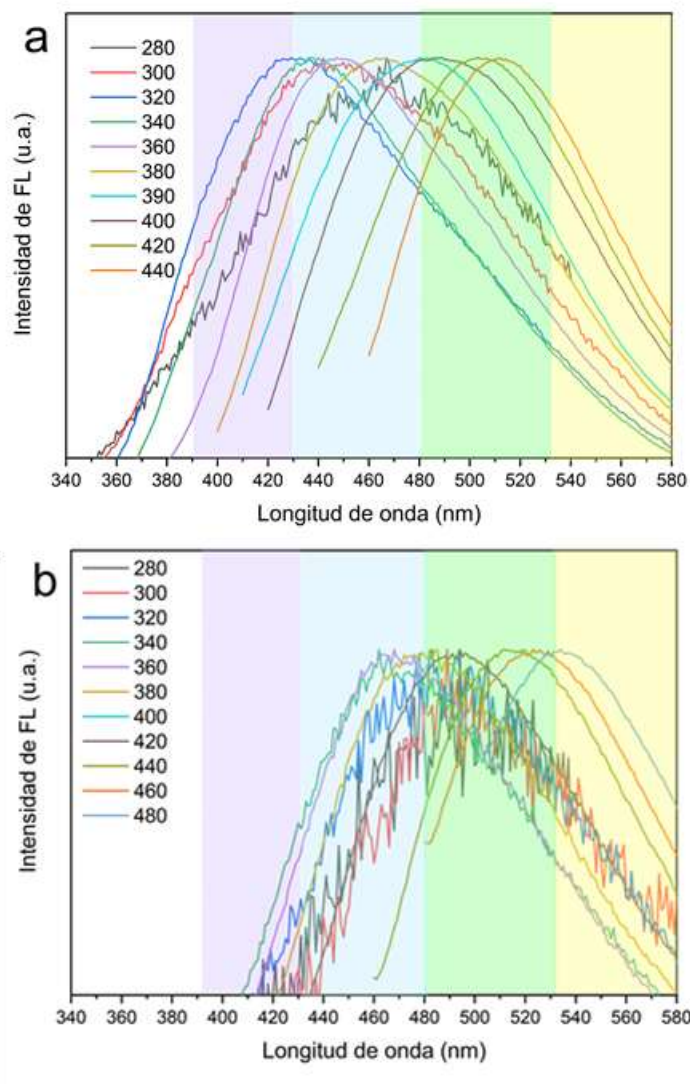


Figura 3. 22. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación para la determinación de las propiedades de phototuning a) en los CQDs y b) para los PEG-CQDs.

Se registraron los espectros de fotoluminiscencia de los CQDs y PEG-CQDs (**Figura 3.23**) utilizando una longitud de excitación de 380 nm. En la figura a) se muestra el comportamiento de las muestras al variar la cantidad de PEG incorporado, mientras que en la figura b) se presenta la influencia del pH en los PEG-CQDs. En ambas se incluyen imágenes de las soluciones bajo luz visible y bajo irradiación ultravioleta, evidenciando los cambios en la emisión óptica.

Para la variación en la concentración de PEG, los CQDs sin modificación superficial mostraron la mayor intensidad de emisión, con un máximo centrado en 527 nm. Conforme se incrementó la cantidad de polímero, la intensidad de fotoluminiscencia disminuyó y el máximo se desplazó ligeramente hacia los 537 nm, indicando una posible alteración de los estados superficiales emisores debido a la interacción con el PEG.

En cuanto a la variación del pH, se observó un incremento en la intensidad de emisión al disminuir el pH a 2 mediante la adición de H_2SO_4 , con un máximo en 514 nm. Al ajustar el pH a 4 con NaOH, la intensidad de luminiscencia aumentó de manera notable; sin embargo, a valores de pH más altos, la fotoluminiscencia se atenuó nuevamente, registrándose máximos en torno a 527 nm para las demás muestras. Este comportamiento sugiere que la protonación y desprotonación de los grupos funcionales superficiales influyen directamente en los procesos de emisión de los CQDs modificados.

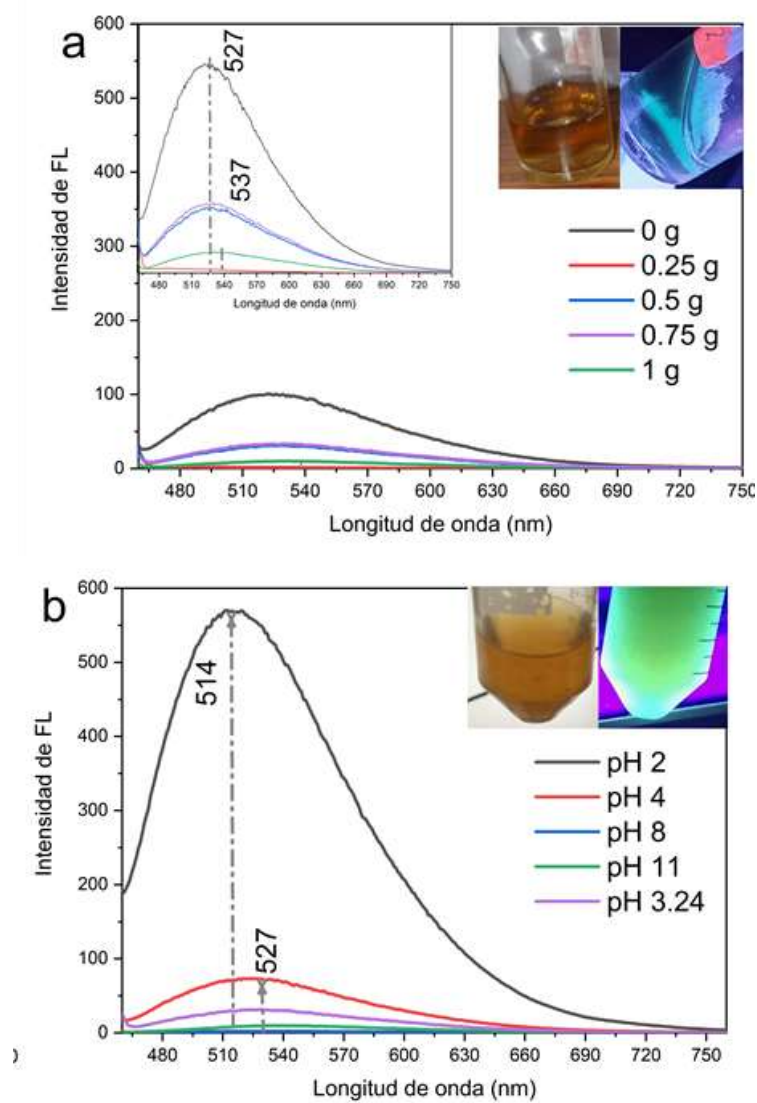


Figura 3. 23. Espectros de fotoluminiscencia a) para el cambio de masa de PEG en los CQDS y b) para el cambio de pH con masa PEG constante.

3.3. CQDs funcionalizados con quitosano

En este apartado se presentan los resultados y la discusión correspondientes a la síntesis de puntos cuánticos de carbono (CQDs) obtenidos a partir de *Cucúrbita moschata* Duchesne mediante el método hidrotermal, manteniendo constantes las condiciones experimentales empleadas en los ensayos previos. Los CQDs obtenidos fueron modificados superficialmente con quitosano en diferentes concentraciones (0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 g) con el propósito de evaluar el efecto de la incorporación del polímero sobre sus propiedades estructurales y ópticas. Este estudio tiene como objetivo analizar la influencia del quitosano en la estabilidad y comportamiento fotoluminiscente de los CQDs, con miras a su aplicación en el ámbito biomédico.

3.3.1. Análisis químico y estructural

TEM

La morfología y el tamaño de los CQDs y Ch-CQDs se analizaron mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) (**Figura 3.24**). En la muestra (a) se observan CQDs sin quitosano, con partículas bien definidas, de forma esférica o semiesférica, tamaños uniformes (~ 3 nm de diámetro promedio) y buena dispersión. En la muestra (b), al incorporar 0.25 g de quitosano, comienzan a apreciarse ligeras aglomeraciones y una matriz amorfa de mayor contraste, lo que sugiere interacción entre las nanopartículas de carbono y el polímero. Con 0.5 g de quitosano (muestra c), se evidencia un cambio en la morfología, con partículas agregadas, bordes irregulares y zonas densas de textura amorfa, atribuibles al recubrimiento polimérico. En la muestra (d), con 0.75 g de quitosano, se distingue una estructura compacta compuesta por cúmulos de CQDs embebidos en una matriz de quitosano. Finalmente, al emplear 1 g de polímero (muestra e), se observa una red densa de partículas incrustadas con textura granular dominante, indicativa de una sobresaturación del recubrimiento.

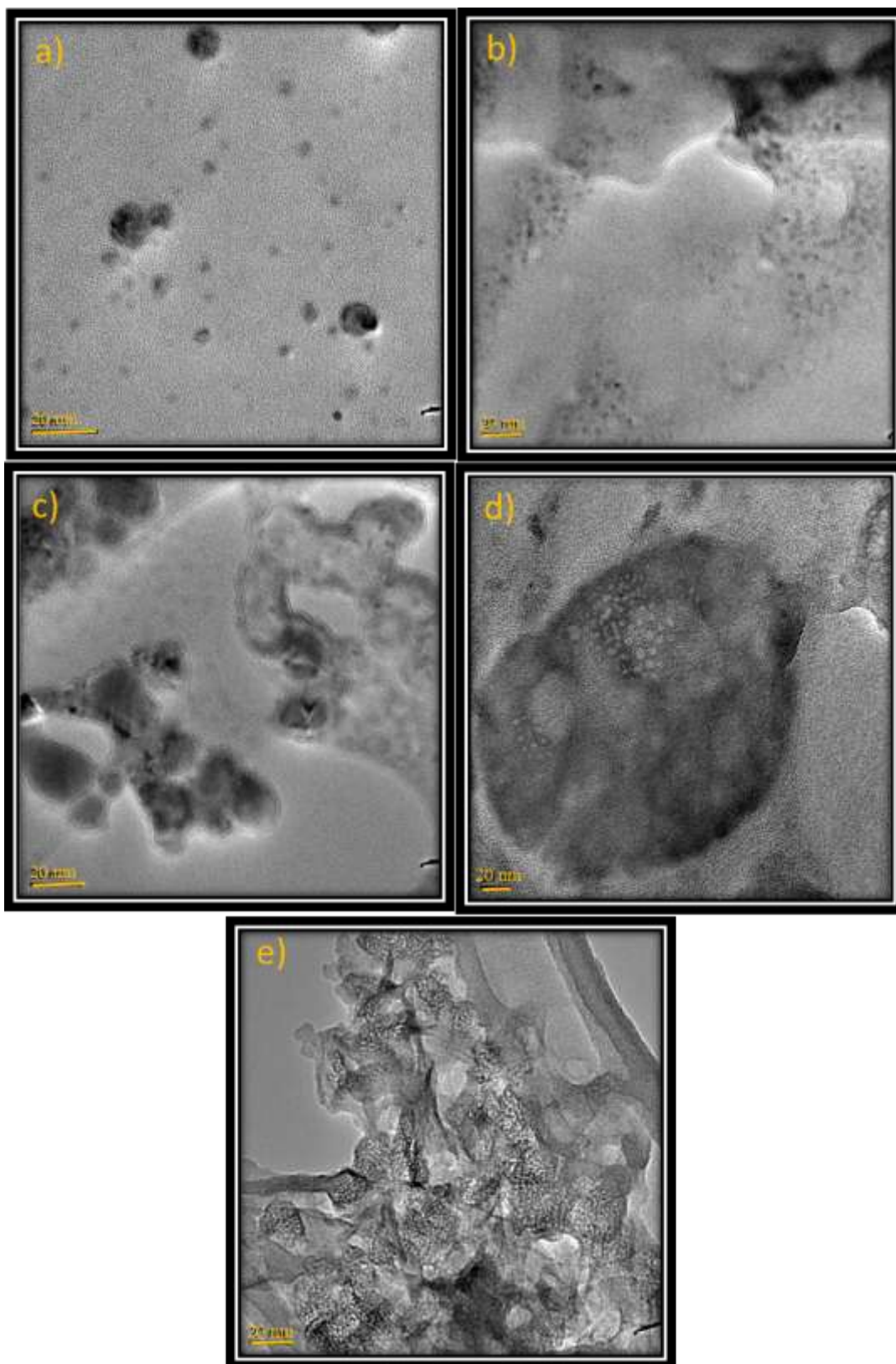


Figura 3. 24. Imágenes TEM de los CQDs con a) 0 g, b) 0.25 g, c) 0.5 g, d) 0.75 g y e) 1 g de quitosano.

FTIR

A partir de los espectros obtenidos por FTIR (Figura 3.25) se identificaron los grupos funcionales presentes en la superficie y estructura de los CQDs, con el objetivo de comprender su interacción con el quitosano. El espectro correspondiente al quitosano muestra bandas características en 3300, 2890, 1625, 1375 y 1020 cm^{-1} , asociadas a los modos de estiramiento o vibración de los grupos funcionales $-\text{OH}$, $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ y $-\text{NH}_2$, respectivamente.

Por otro lado, el espectro de los CQDs presenta señales típicas de este tipo de nanopartículas de carbono, destacando bandas en 3300, 2100 y 1625 cm^{-1} , atribuidas a los grupos $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$ y $\text{C}=\text{C}$, respectivamente. Tras la incorporación del quitosano, se observa un incremento progresivo en la intensidad de las bandas correspondientes al polímero ($\text{C}-\text{H}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ y $-\text{NH}_2$), acompañado de una disminución en la banda asociada al grupo $-\text{OH}$, lo que sugiere la formación de interacciones entre el quitosano y los grupos funcionales superficiales de los CQDs.

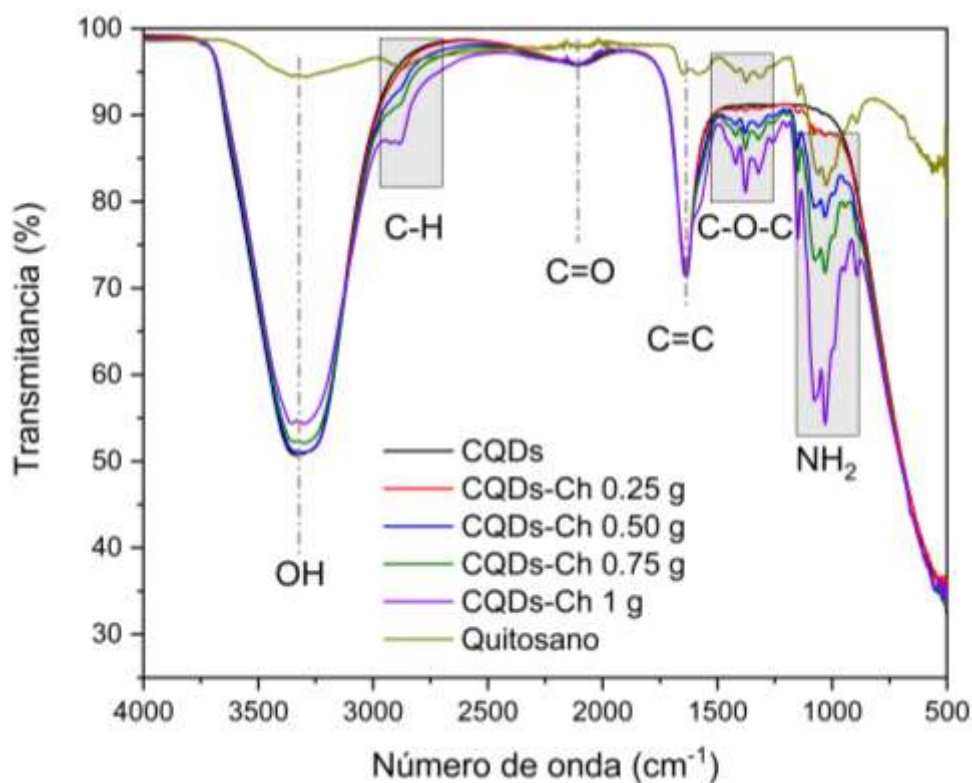


Figura 3. 25. Espectros FTIR de las diferentes muestras de Ch-CQDs.

3.3.2. Formación y modificación superficial

La calabaza (*Cucurbita moschata* Duchesne), fruto perteneciente a la familia de las cucurbitáceas, contiene en su composición una variedad de compuestos orgánicos como azúcares (glucosa, sacarosa y fructosa), polisacáridos (pectina y hemicelulosa), ácidos orgánicos y compuestos fenólicos. Estos componentes la convierten en un precursor de carbono ideal para la síntesis de puntos cuánticos de carbono (CQDs).

La formación de los CQDs a partir de este tipo de fuentes naturales se describe en la literatura mediante tres etapas fundamentales (**Figura 3.26**): descomposición, nucleación o polimerización y crecimiento [13]. Durante el tratamiento hidrotermal, las condiciones de temperatura y presión inducen la descomposición de las moléculas orgánicas a través de procesos de hidrólisis, oxidación, deshidratación, descarboxilación y aromatización, generando nuevos dominios ricos en carbono [314] Este proceso favorece la aparición de grupos oxigenados en la estructura intermedia.

Posteriormente, ocurre la nucleación o polimerización por condensación entre alcoholes y aldehídos, dando lugar a estructuras amorfas o semicristalinas con núcleos compuestos por hibridaciones sp^2 y sp^3 [315]. Finalmente, durante la etapa de crecimiento, se produce la formación de nanopartículas de carbono con estructura grafitica y grupos funcionales superficiales que confieren estabilidad y reactividad química a los CQDs [316].

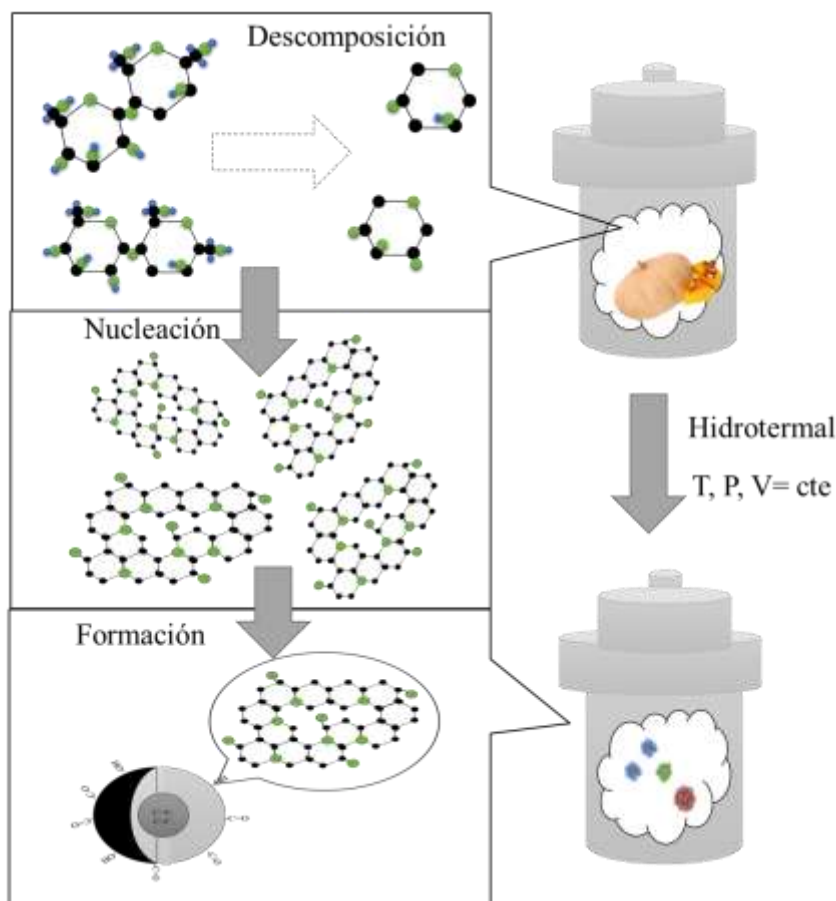


Figura 3. 26. Proceso de formación de los CQDs en la reacción hidrotermal a partir de la calabaza.

La pasivación superficial de los CQDs se llevó a cabo utilizando quitosano como agente de funcionalización. Este biopolímero contiene grupos funcionales como aminas primarias ($-\text{NH}_2$) e hidroxilos ($-\text{OH}$), capaces de establecer interacciones químicas y físicas con la superficie de los CQDs, modificando sus propiedades estructurales y ópticas.

A partir de los espectros FTIR, se pueden identificar las principales interacciones entre el quitosano y los CQDs. Se observa un desplazamiento y disminución en la intensidad de la banda ubicada en torno a 3300 cm^{-1} , asociada a los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), así como una intensificación y multiplicación de las bandas en 1375 y 1020 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones del $\text{C}-\text{H}$ y $\text{C}-\text{O}-\text{C}/\text{NH}_2$, respectivamente. Estos cambios sugieren la existencia de una interacción superficial mixta entre las nanopartículas y el polímero, que puede involucrar tanto enlaces covalentes como fuerzas no covalentes (**Figura 3.27**) [316].

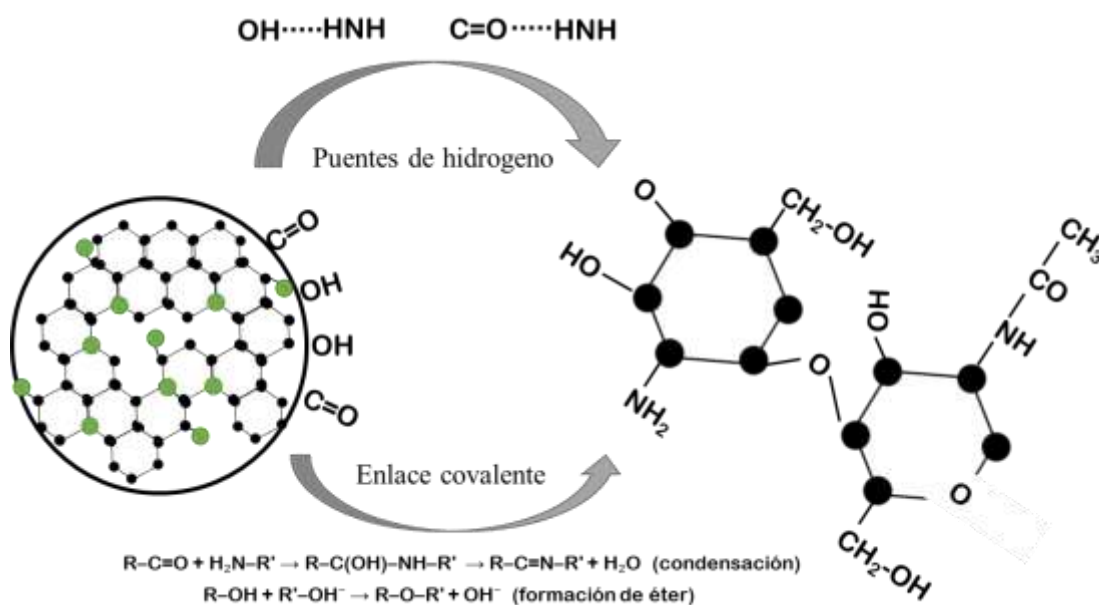


Figura 3. 27. Interacción entre los CQDs y el quitosano.

3.3.3. Propiedades ópticas

Absorción y energía de banda prohibida

La determinación de las propiedades de absorbancia de los CQDs y Ch-CQDs se realizó mediante espectroscopia UV-Vis, obteniendo los espectros de absorción correspondientes (**Figura 3.28**). Todas las muestras presentan una banda de absorción intensa entre 255 y 285 nm, atribuida a las transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ de los enlaces C=C del núcleo aromático gráfico característico de los CQDs. Asimismo, se observa una segunda señal que inicia alrededor de los 295 nm y se extiende hacia la región visible, asociada a transiciones $n-\pi^*$ de grupos oxigenados (C=O) o nitrogenados (NH₂) presentes en la superficie o estructura de las partículas. Estas absorciones, inicialmente localizadas en la región ultravioleta, se prolongan hacia el visible mostrando un comportamiento más plano, lo que indica una mayor interacción superficial. Las muestras funcionalizadas con quitosano presentan una absorbancia más intensa, lo que sugiere una modificación electrónica asociada a la pasivación superficial.

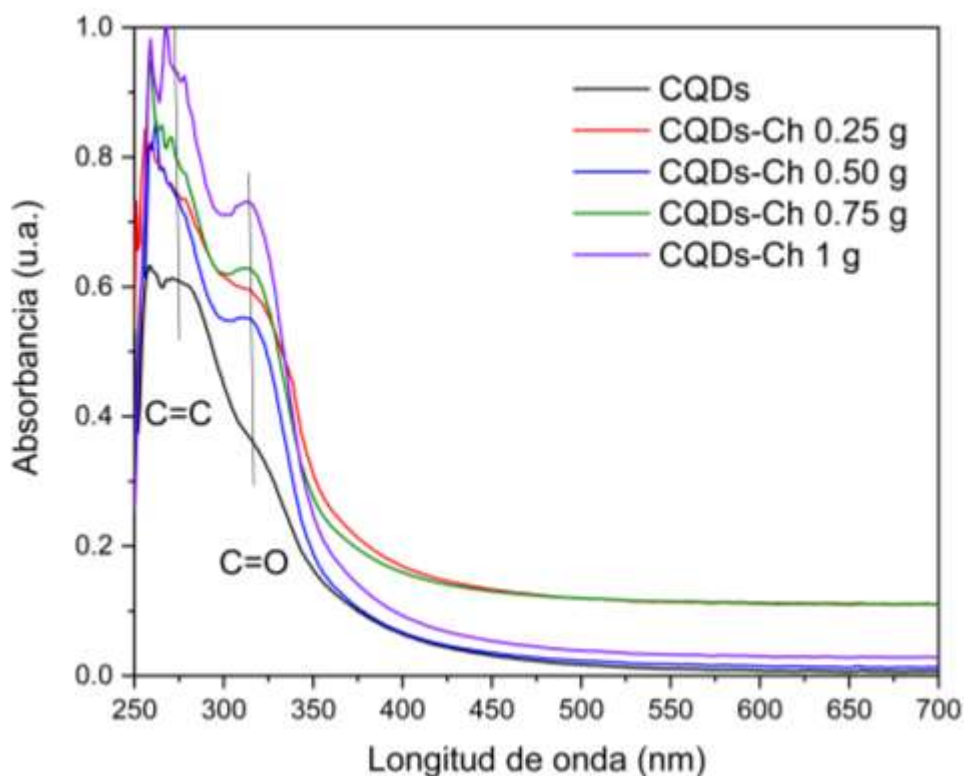


Figura 3. 28. Espectros UV de las diferentes muestras de Ch-CQDs.

A partir de los datos de absorción se determinaron los valores del ancho de banda prohibida mediante el método de Tauc (**Figura 3.29**), considerando transiciones electrónicas directas permitidas. Se observa un incremento en la energía de banda prohibida conforme aumenta la cantidad de quitosano incorporado. Los CQDs sin polímero presentan un valor de 2.5 eV, mientras que las muestras con concentraciones intermedias de quitosano (0.25–0.75 g) muestran valores cercanos a 2.8 eV. Finalmente, los Ch-CQDs obtenidos con 1 g de quitosano alcanzan un valor máximo de 2.9 eV, indicando que la pasivación superficial con el biopolímero influye en la estructura electrónica del material.

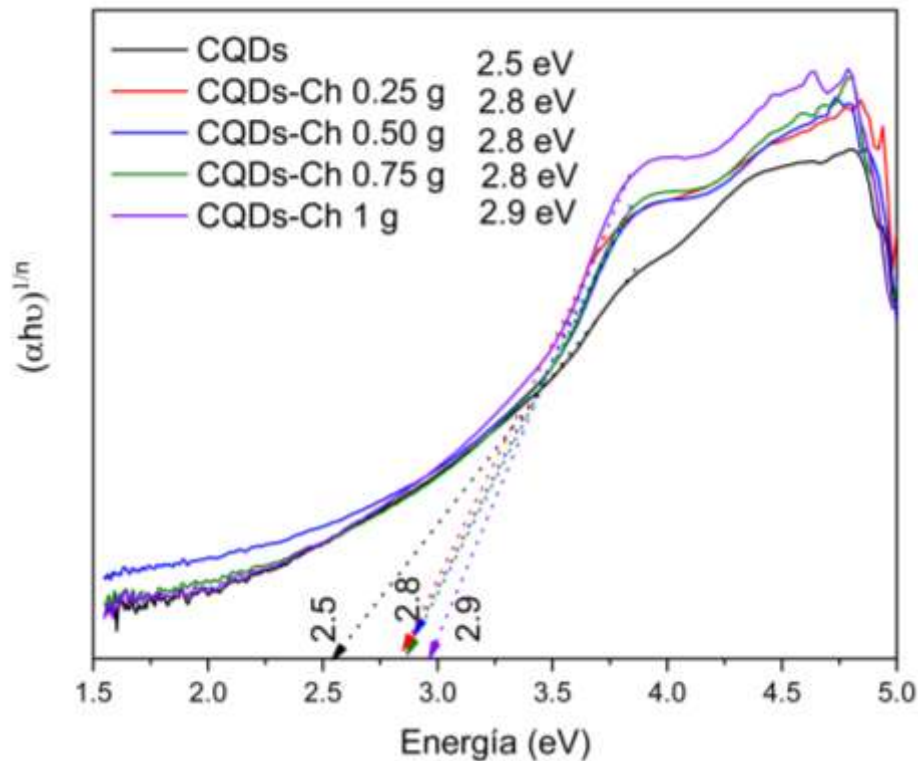


Figura 3. 29. Gráfico de Tauc para el cálculo de banda prohibida en las diferentes muestras de Ch-CQDs.

Fotoluminiscencia

Para evaluar el fototuning de los CQDs y Ch-CQDs se obtuvieron los espectros de emisión a diferentes longitudes de onda de excitación (**Figura 3.30**), variando de 360 a 480 nm en intervalos de 20 nm, con el propósito de analizar el efecto del incremento de la masa de quitosano sobre la respuesta óptica de los CQDs. En todas las muestras se observa una marcada dependencia de la longitud de onda de excitación en la forma e intensidad de los espectros de emisión. Los CQDs presentan máximos de emisión en las regiones verde y amarilla del espectro visible, con una extensión hasta el rojo; en contraste, los Ch-CQDs muestran sus máximos de emisión en las regiones azul y verde, extendiéndose hasta el naranja. Además, se evidencia una variación en la intensidad de la fotoluminiscencia conforme aumenta la cantidad de quitosano, alcanzando los máximos de emisión al ser excitados a 440 y 460 nm.

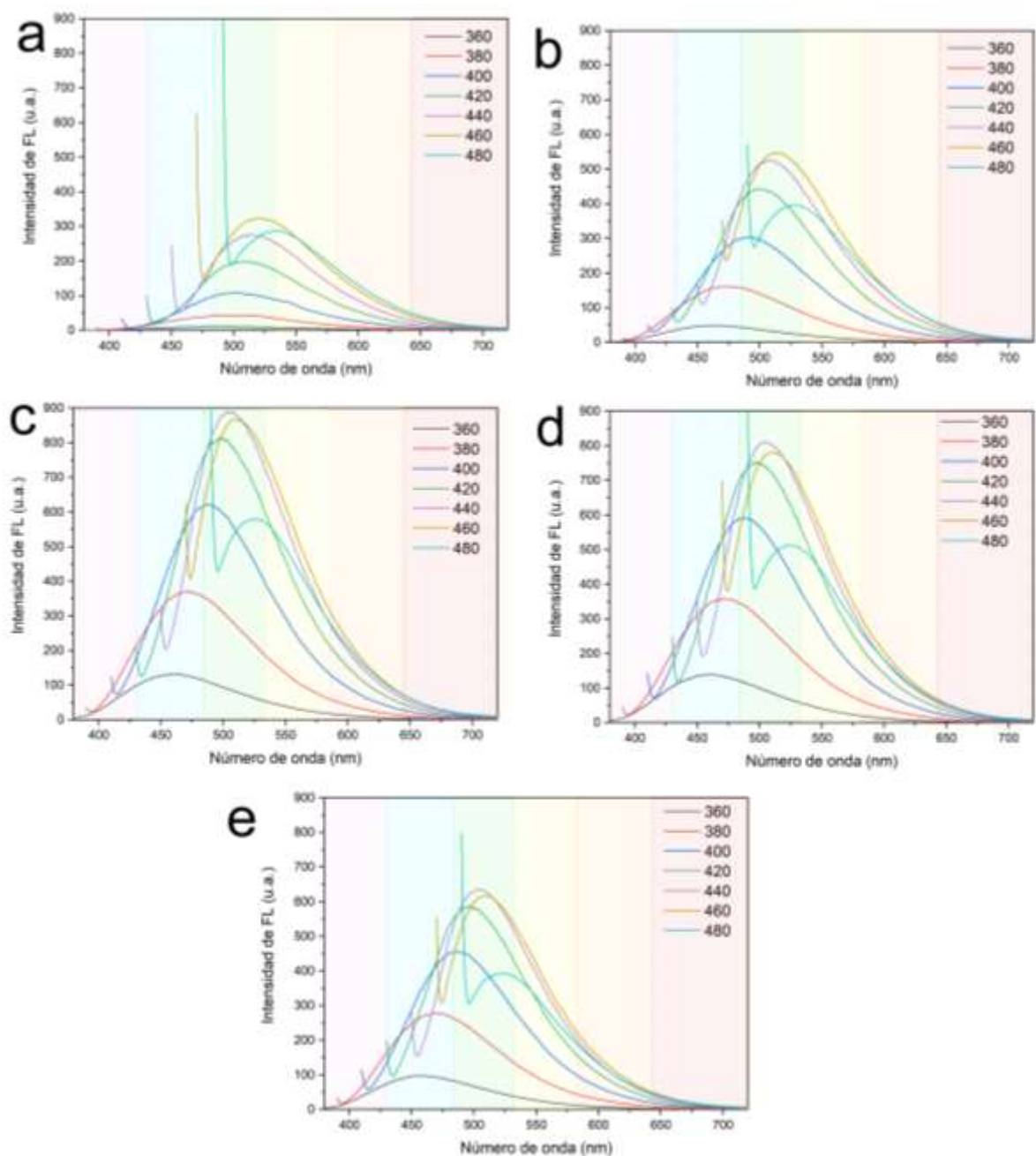


Figura 3. 30. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación para la determinación de las propiedades de phototuning de los CQDs con a) 0 g, b) 0.25 g, c) 0.5 g, d) 0.75 g y e) 1 g de quitosano.

Para resaltar los cambios en la intensidad de emisión, se realizó un resumen de los espectros anteriores en una sola gráfica (**Figura 3.31**). En esta comparación se observa que, en todas las longitudes de onda de excitación, la muestra sin quitosano presenta la menor intensidad de emisión, mientras que la mayor intensidad se alcanza con una concentración intermedia

del polímero (0.5 g). A partir de este punto, un incremento adicional en la cantidad de quitosano provoca una disminución gradual en la intensidad fotoluminiscente.

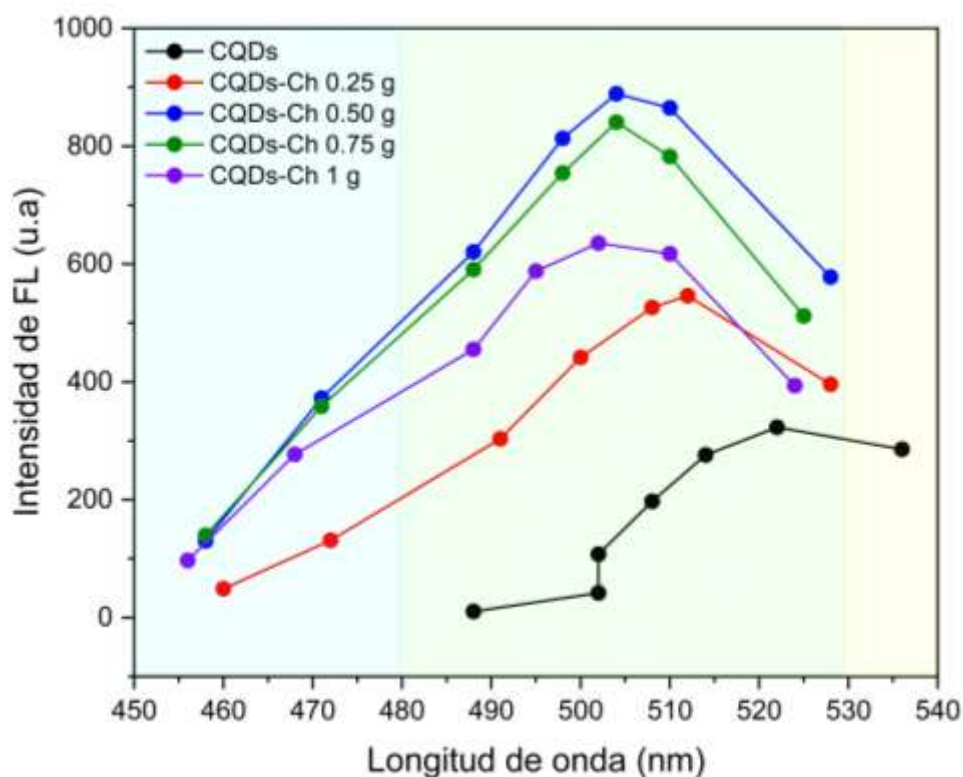


Figura 3. 31. Máximos en la intensidad de todas las muestras de Ch-CQDs a las diferentes longitudes de onda de excitación.

Para comparar las intensidades de emisión de los CQDs y Ch-CQDs, se graficaron los espectros correspondientes a una longitud de onda de excitación de 440 nm (**Figura 3.32**). En todas las muestras se observa una tendencia similar a la descrita anteriormente: la intensidad de emisión aumenta conforme incrementa la cantidad de quitosano, alcanzando un máximo en la muestra con 0.5 g de polímero, para luego disminuir al continuar elevando su concentración. En los espectros se incluyen imágenes de las muestras bajo luz visible y ultravioleta (365 nm); los CQDs presentan una coloración marrón característica y una emisión verde bajo la luz UV, mientras que los Ch-CQDs muestran soluciones más incoloras debido a la naturaleza no cromofórica del quitosano, con emisiones que varían entre tonos azulados y verdosos al ser excitadas.

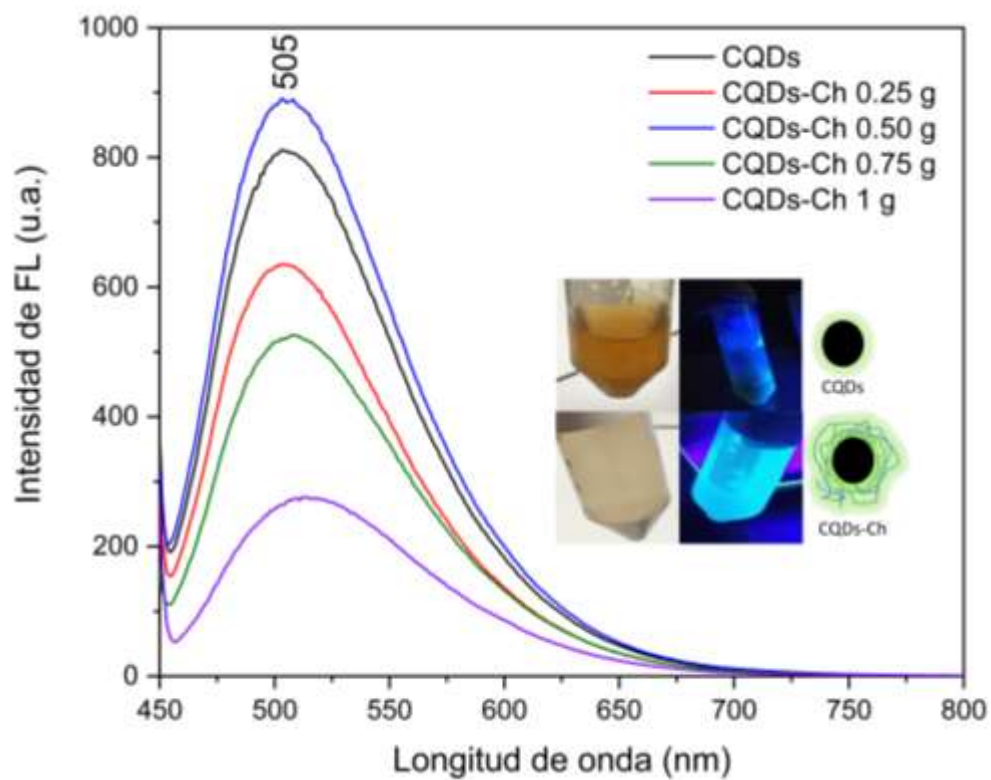


Figura 3. 32. Espectros de fotoluminiscencia en las diferentes muestras de Ch-CQDs, fotográfica del cambio de coloración en las muestras de CQDs y Ch-CQDs bajo luz visible y luz ultravioleta.

3.4. Funcionalización con Fe₃O₄

En este apartado se presentan los resultados y la discusión correspondientes a la síntesis y caracterización de un sistema “2 en 1”, compuesto por una fase sólida (Fe₃O₄-CQDs), formada por una matriz de magnetita decorada superficialmente con puntos cuánticos de carbono (CQDs), y una fase líquida (L-CQDs) constituida por CQDs en suspensión. La fuente de carbono empleada fue jugo de sandía (*Citrullus lanatus*), mientras que los precursores de la magnetita fueron cloruro férrico, cloruro ferroso e hidróxido de sodio. La síntesis se llevó a cabo mediante el método hidrotermal, variando el volumen del jugo de sandía (10, 20, 30 y 40 mL) y manteniendo constantes las demás condiciones experimentales. Este estudio se enfoca en analizar las modificaciones estructurales y ópticas de los L-CQDs y Fe₃O₄-CQDs, así como en explorar el potencial de los Fe₃O₄-CQDs para aplicaciones en bioimagen celular.

3.4.1. Análisis químico y estructural

MEB

La morfología y el tamaño de las partículas Fe₃O₄-CQDs se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) (**Figura 3.33**). Todas las muestras presentan una morfología irregular, conformada por aglomerados con dimensiones micrométricas. En la imagen a) correspondiente a la muestra de Fe₃O₄ sin CQDs, se observan superficies con bordes definidos. En la imagen b), al incorporar 10 mL de jugo de sandía, se aprecia una ligera modificación superficial, con bordes más marcados. La imagen c), correspondiente a 20 mL de jugo, muestra una superficie más heterogénea y difusa, atribuida a una mayor presencia de CQDs. En la imagen d), con 30 mL, se distinguen zonas con mayor recubrimiento y formación de estructuras sobre la superficie de la magnetita, evidenciando un proceso de decoración progresiva. Finalmente, en la imagen e), con 40 mL de jugo, se observa un recubrimiento más uniforme y una saturación superficial de CQDs sobre las partículas de Fe₃O₄.

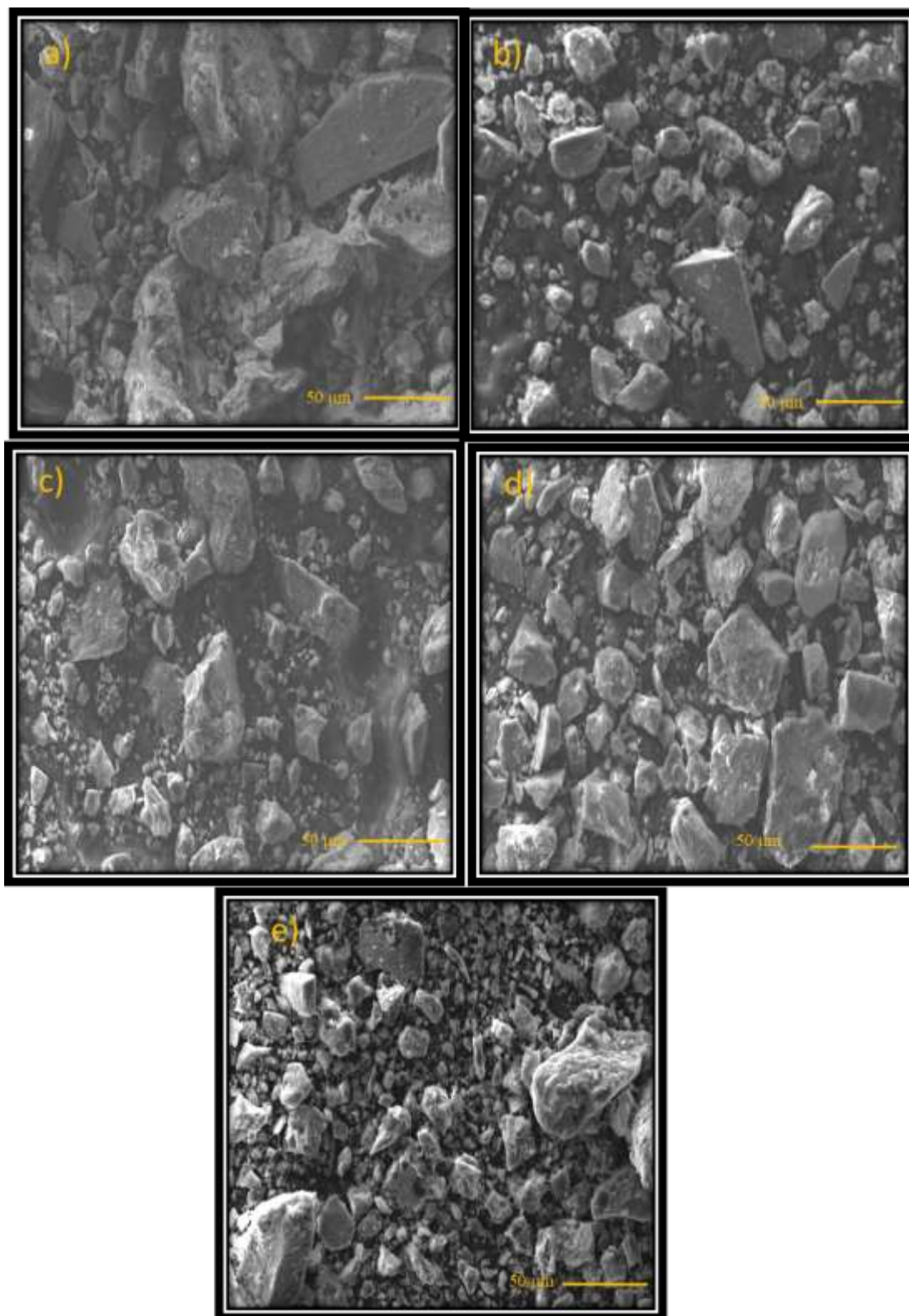


Figura 3. 33. Imágenes MEB de a) Fe_3O_4 , b) Fe_3O_4 con 10 mL, c) Fe_3O_4 con 20 mL, d) Fe_3O_4 con 30 mL y Fe_3O_4 con 40 mL.

Asimismo, se realizó un conteo de partículas para determinar el tamaño promedio de los Fe_3O_4 -CQDs y del Fe_3O_4 puro. Las mediciones se efectuaron mediante el software ImageJ, y el análisis estadístico se llevó a cabo con Origin. Los histogramas de frecuencia (**Figura 3.34**) muestran una tendencia decreciente en el tamaño promedio de partícula conforme aumenta el volumen del precursor de carbono. En la muestra a), correspondiente al Fe_3O_4 sin CQDs, se observa una distribución amplia, con tamaños entre 1 y 50 μm , predominando partículas cercanas a los 10 μm y una alta frecuencia en intervalos mayores. En las muestras b) y c), con la incorporación de jugo de sandía, se aprecia una disminución en la frecuencia de partículas de gran tamaño. Finalmente, en las muestras d) y e), el efecto pasivador del jugo se intensifica, reduciendo los rangos de tamaño a intervalos entre 1 y 40 μm , lo que sugiere una mayor estabilidad y control en el crecimiento de las partículas.

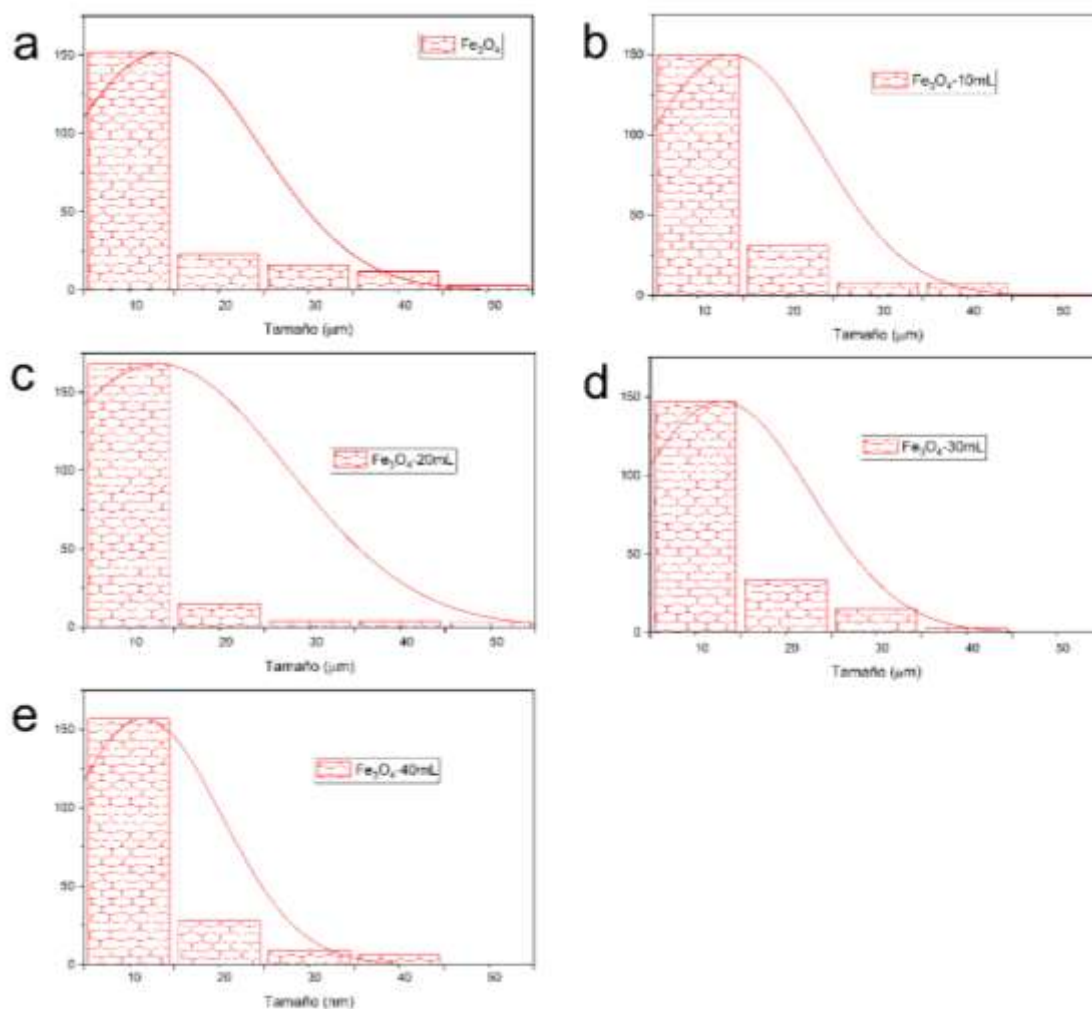
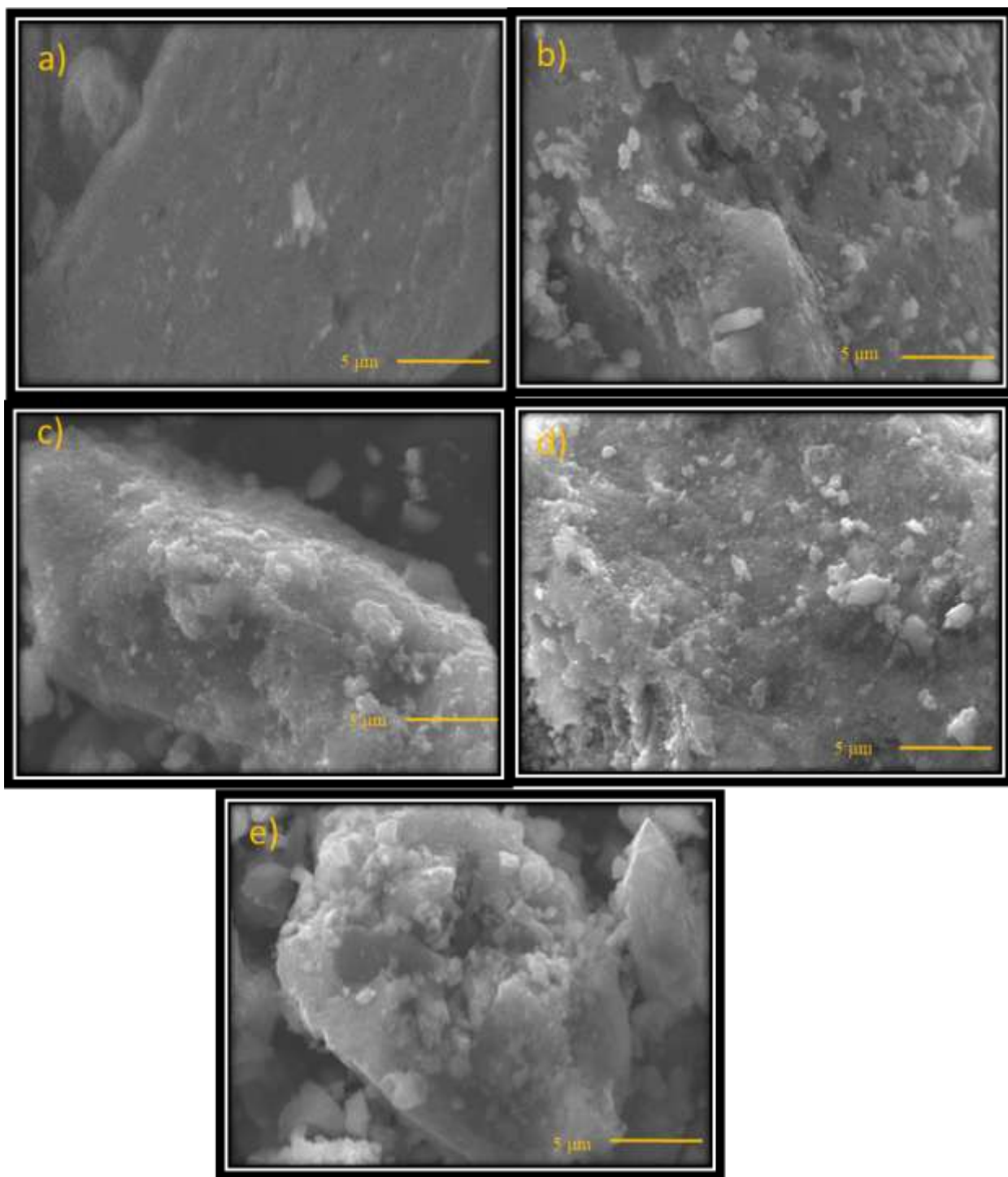


Figura 3. 34. Histograma de distribución de tamaños de las partículas de a) Fe_3O_4 , b) Fe_3O_4 con 10 mL, c) Fe_3O_4 con 20 mL, d) Fe_3O_4 con 30 mL y Fe_3O_4 con 40 mL

Con el propósito de analizar con mayor detalle la superficie decorada del material, se obtuvieron imágenes MEB a mayores aumentos (**Figura 3.35**). En la muestra a), correspondiente al Fe_3O_4 sin la presencia de CQDs, no se aprecian estructuras adicionales, observándose únicamente la superficie característica del óxido. En las muestras b) y c), sintetizadas con 10 y 20 mL de jugo de sandía respectivamente, comienzan a distinguirse estructuras distribuidas sobre la superficie, consistentes en aglomerados nanométricos de morfología irregular, atribuibles a la baja concentración de CQDs. Finalmente, en las muestras d) y e), obtenidas con volúmenes de 30 y 40 mL, se observa un recubrimiento superficial más denso y homogéneo, indicando una decoración progresiva de la magnetita con CQDs conforme aumenta el volumen del precursor de carbono.



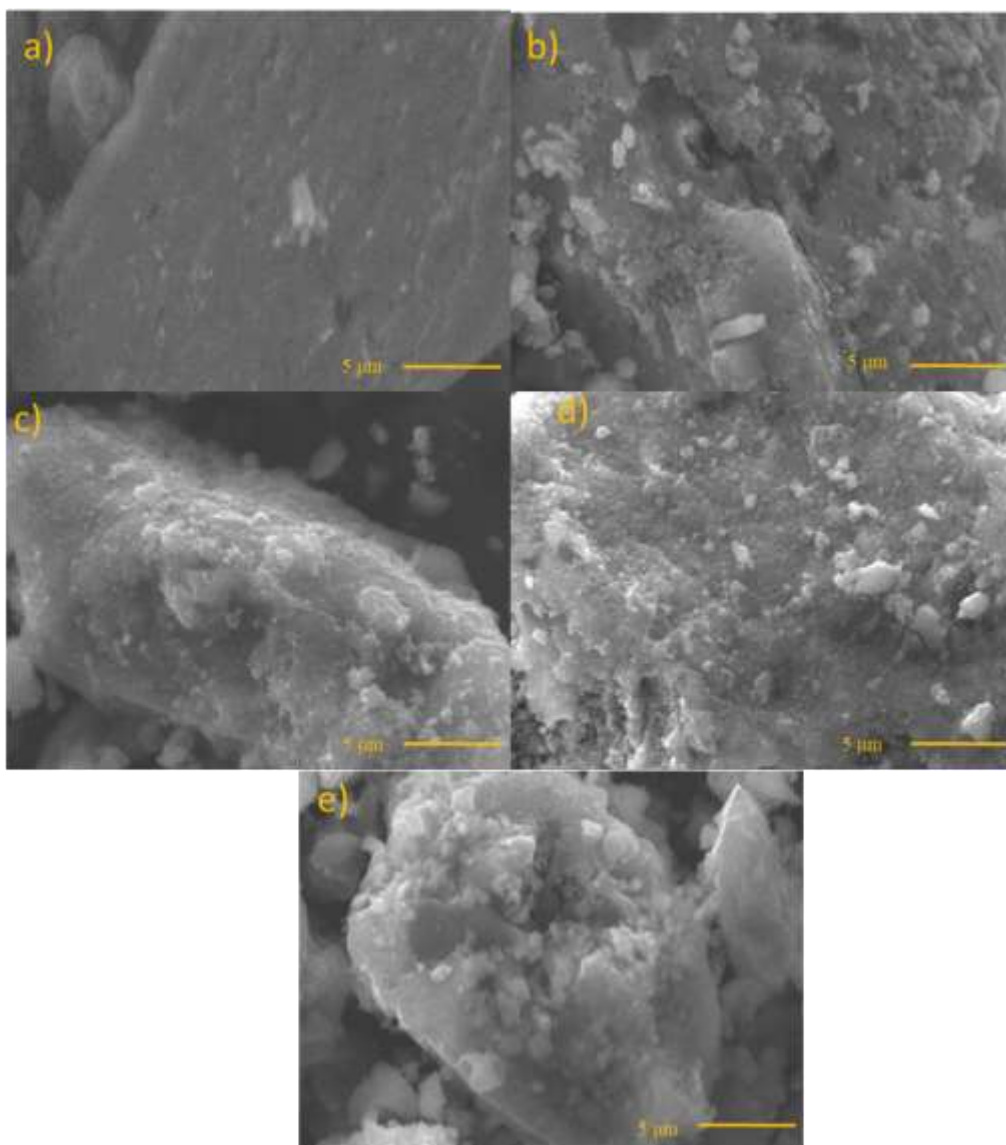


Figura 3. 35. Imágenes MEB con más resolución en las partículas de a) Fe_3O_4 , b) Fe_3O_4 con 10 mL, c) Fe_3O_4 con 20 mL, d) Fe_3O_4 con 30 mL y Fe_3O_4 con 40 mL para observar el decorado superficial.

DRX

La evaluación de las características estructurales de las muestras obtenidas para ambas fases se realizó mediante difracción de rayos X (**Figura 3.36**). En los patrones correspondientes a los compuestos Fe_3O_4 -CQDs y Fe_3O_4 , se identificaron los planos cristalográficos característicos de la fase magnetita cúbica, en concordancia con la tarjeta PDF 00-039-1346. Se distinguieron los picos principales localizados en 30.2° , 35.7° , 43.1° , 53.4° , 57.1° y 62.9° , correspondientes a los planos (220), (311), (400), (420), (511) y (440), respectivamente, confirmando la estructura cúbica tipo espinela.

Con la incorporación del jugo de sandía y los CQDs en la matriz de Fe_3O_4 , se observa además la aparición de un nuevo pico alrededor de 13.1° , asociado al plano (111), que concuerda con la referencia PDF 00-046-0943 (C, Carbon), evidenciando la presencia de carbono amorfo en las muestras decoradas.

A partir de los difractogramas y mediante la ecuación de Scherrer, se estimaron los tamaños de cristalito para la fase de Fe_3O_4 , obteniéndose valores de 20.2 nm, 15.1 nm, 13.5 nm, 12.3 nm y 10.2 nm para las muestras con 0, 10, 20, 30 y 40 mL de jugo de sandía, respectivamente. Estos resultados sugieren una disminución progresiva en el tamaño cristalino conforme aumenta la concentración del precursor carbonoso, lo que podría atribuirse al efecto de confinamiento y la interacción superficial con los CQDs durante la síntesis hidrotérmica.

Por otra parte, en las muestras correspondientes a los L-CQDs se identificó igualmente el pico a 13.1° correspondiente al plano (111), característico del carbono amorfo. En las muestras obtenidas con 10, 20, 30 y 40 mL de jugo, además de dicha banda, se observaron picos adicionales más definidos en 31.7° , 45.9° , 56.3° , 66.2° y 75.1° , asociados a los planos (200), (220), (222), (400) y (420), respectivamente, los cuales corresponden a una estructura cúbica del cloruro de sodio (NaCl), conforme a la carta PDF 00-005-0628. Esto indica la formación de fases residuales provenientes de los precursores utilizados durante la síntesis de la magnetita.

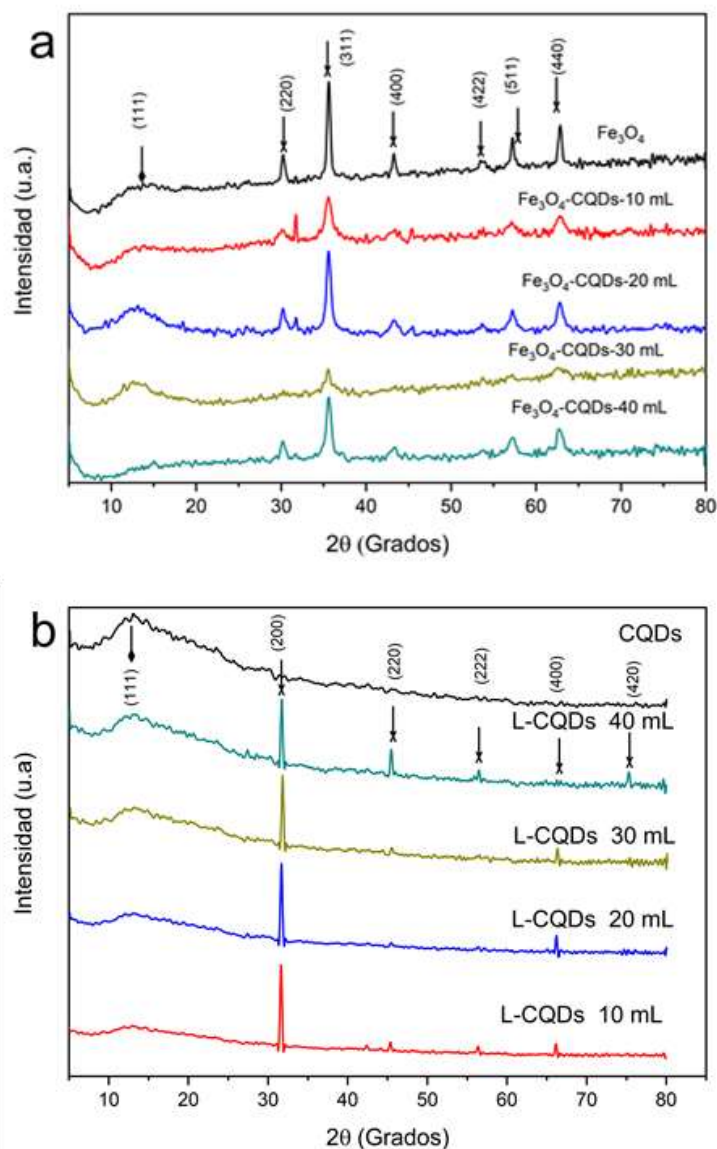


Figura 3. 36. Patrones de difracción de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.

FTIR

Para la identificación de las vibraciones moleculares asociadas a los grupos orgánicos presentes en la estructura y superficie de los L-CQDs y Fe_3O_4 -CQDs se realizaron espectros FTIR (**Figura 3.37**). En la parte a), correspondiente a las fases sólidas de Fe_3O_4 -CQDs y Fe_3O_4 , la muestra sin la presencia de CQDs muestra una banda intensa alrededor de 580 cm^{-1} , atribuida a la vibración de estiramiento del enlace metal-oxígeno (Fe-O). Con la incorporación del carbono, los espectros presentan nuevas bandas en 3428 , 1621 , 1370 , 1052 , 618 y 392 cm^{-1} , asignadas a las vibraciones de estiramiento del grupo hidroxilo (O-H), a la vibración C=C de carácter aromático, a los grupos carbonilo (C=O), C-O, Fe-C-O y F-O,

respectivamente. Estas señales confirman la presencia de grupos funcionales característicos de los CQDs, indicando una modificación superficial del Fe_3O_4 por interacción con las especies carbonadas.

En la parte b), correspondiente a la fase líquida (L-CQDs), se observa una banda ancha centrada en 3321 cm^{-1} , asociada a los grupos O–H típicos de los CQDs en medio acuoso. Asimismo, se presenta una banda en 1639 cm^{-1} relacionada con las vibraciones C=C de la estructura carbonada y otra en torno a 600 cm^{-1} que sugiere la presencia de interacciones M–O o M–C–O, evidenciando una posible coordinación entre el carbono y el hierro en el sistema.

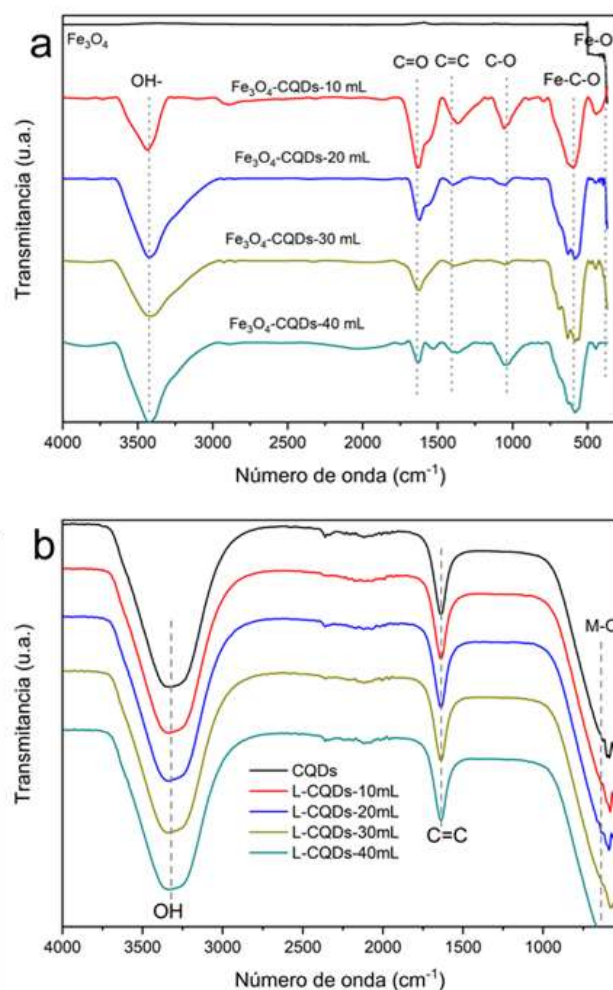
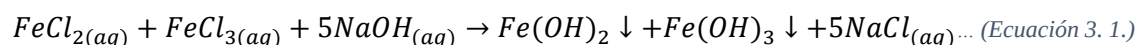


Figura 3. 37. Espectros FTIR de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.

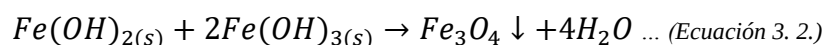
3.4.2. Formación y modificación superficial/estructural

Fe₃O₄ y Fe₃O₄-CQDs

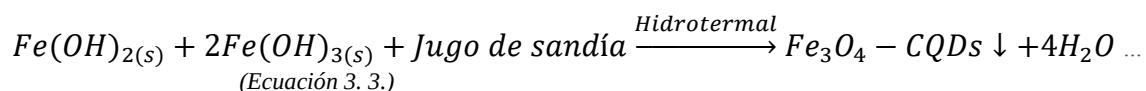
Para la obtención de la magnetita y su posterior decorado superficial (Figura 3.38), se mezclaron cloruro férrico (FeCl₃), cloruro ferroso (FeCl₂) e hidróxido de sodio (NaOH), lo que condujo a la formación de precipitados de hidróxido férrico (Fe(OH)₃), hidróxido ferroso (Fe(OH)₂) y cloruro de sodio (NaCl) como subproducto, según la reacción mostrada en la **ecuación 3.1**.



Previo al tratamiento hidrotermal, se añadió jugo de sandía como fuente de carbono, el cual actúa como precursor para la formación y anclaje superficial de los puntos cuánticos de carbono (CQDs). Durante el proceso hidrotermal, los hidróxidos formados se deshidratan y reestructuran térmicamente, generando magnetita (Fe₃O₄) de acuerdo con la **ecuación 3.2**



Cuando el jugo de sandía está presente en la mezcla de reacción, los compuestos orgánicos del precursor se carbonizan parcialmente bajo las condiciones hidrotermales, originando CQDs que se anclan sobre la superficie de la magnetita, formando el sistema Fe₃O₄-CQDs, según la **ecuación 3.3**.



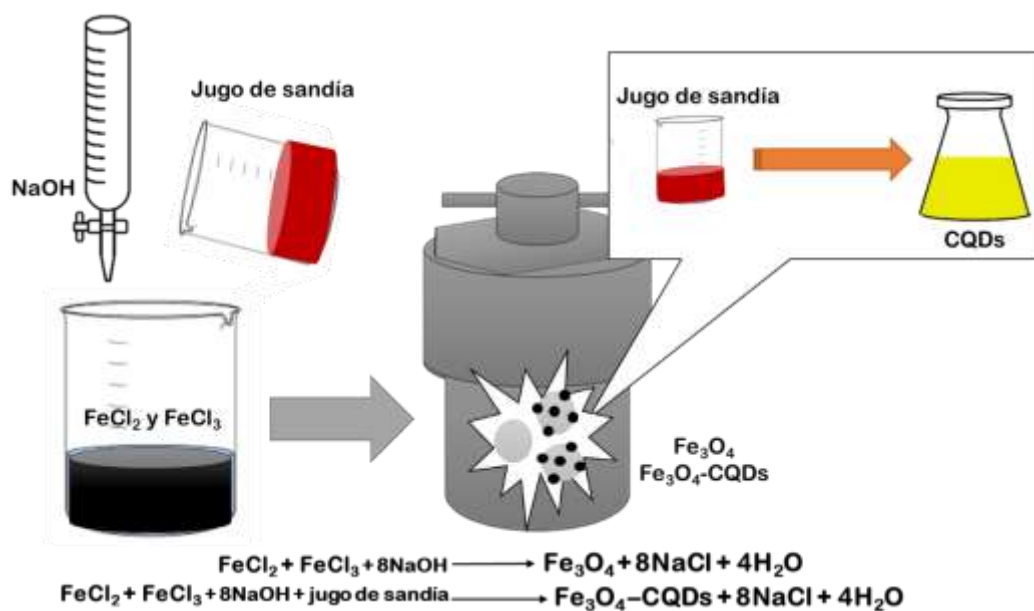
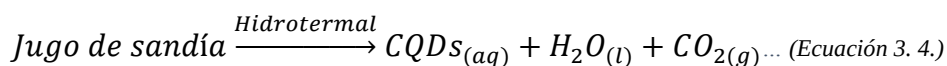


Figura 3. 38. Reacción y formación de Fe_3O_4 y $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$ mediante síntesis hidrotermal.

CQDs y L-CQDs

La sandía (*Citrullus lanatus*), perteneciente a la familia *Cucurbitaceae*, se empleó como fuente precursora de los CQDs y L-CQDs debido a su composición rica en agua, carbohidratos, proteínas y lípidos. Bajo condiciones hidrotermales de alta temperatura y presión, estos componentes orgánicos experimentan un proceso de carbonización controlada, seguido de reacciones de deshidratación y condensación aromática, que conducen a la formación de núcleos carbonosos y, posteriormente, a la generación de los puntos cuánticos de carbono con grupos funcionales superficiales oxigenados y nitrogenados. Este proceso global puede representarse mediante la **Ecuación 3.4**.



Durante la síntesis, los iones Fe^{2+} , Fe^{3+} , Na^+ y Cl^- provenientes de los precursores inorgánicos de la magnetita pueden interactuar con los grupos funcionales oxigenados presentes en los CQDs. Estas interacciones favorecen un posible dopaje heteroatómico o una modificación superficial de las nanopartículas, promoviendo una interfaz química entre la fase inorgánica (Fe_3O_4) y la fase carbonosa (CQDs) (**Figura 3.39.**).

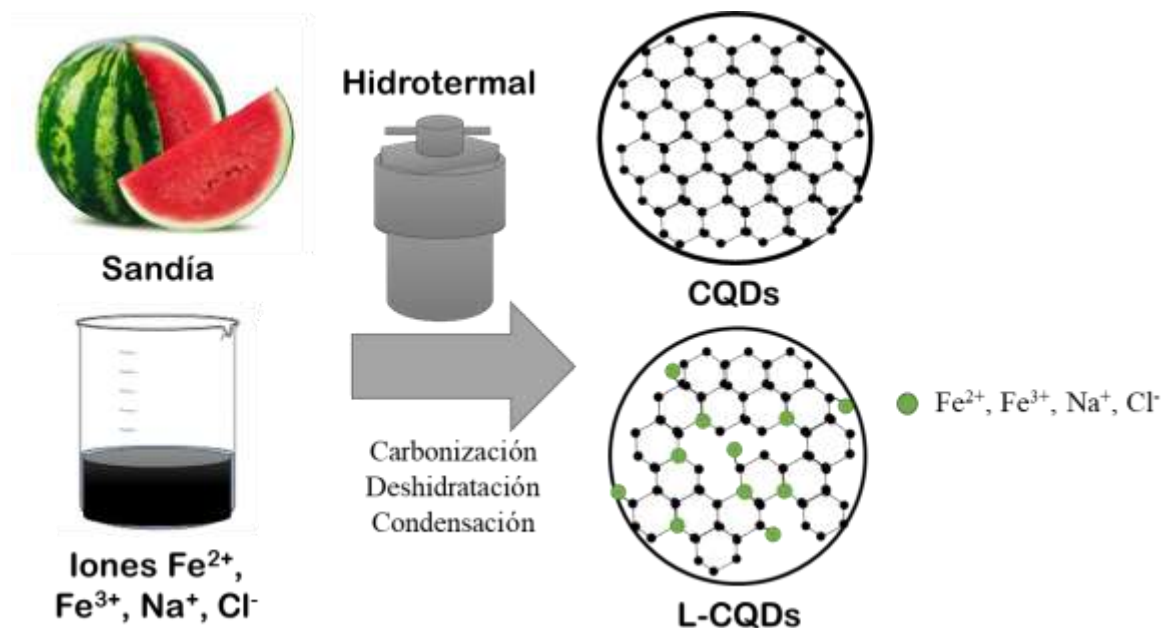


Figura 3. 39. Reacción y formación de los CQDs y L-CQDs mediante la síntesis hidrotermal.

3.4.3. Propiedades ópticas

Absorción y energía de banda prohibida

Las propiedades ópticas de absorbancia de las partículas sintetizadas se determinaron mediante espectroscopia UV-Vis, obteniendo los espectros de absorción (**Figura 3.40**). En la Figura 3.40a se observa el espectro correspondiente al Fe_3O_4 sin la presencia de CQDs, el cual presenta un comportamiento monótono con una disminución progresiva de la absorbancia al incrementar la longitud de onda, sin evidenciar un máximo definido. En contraste, los compuestos Fe_3O_4 -CQDs exhiben dos bandas de absorción centradas alrededor de los 225 y 280 nm que se extienden hacia la región visible. Estas bandas son características de las transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ asociadas a los enlaces $\text{C}=\text{C}$ de los dominios aromáticos gráfiticos de los CQDs, y de las transiciones $n-\pi^*$ de los grupos carbonilos ($\text{C}=\text{O}$), confirmando la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie y estructura del material.

En la Figura 3.40b, correspondiente a la fase líquida (L-CQDs), se observan igualmente dos bandas de absorción a 225 y 285 nm, con mayor definición y nitidez que las muestras sólidas. Dichas señales se atribuyen a las mismas transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ y $n-\pi^*$, evidenciando una estructura carbonosa bien desarrollada y una mayor proporción de grupos funcionales

superficiales oxigenados responsables del comportamiento óptico característico de los CQDs.

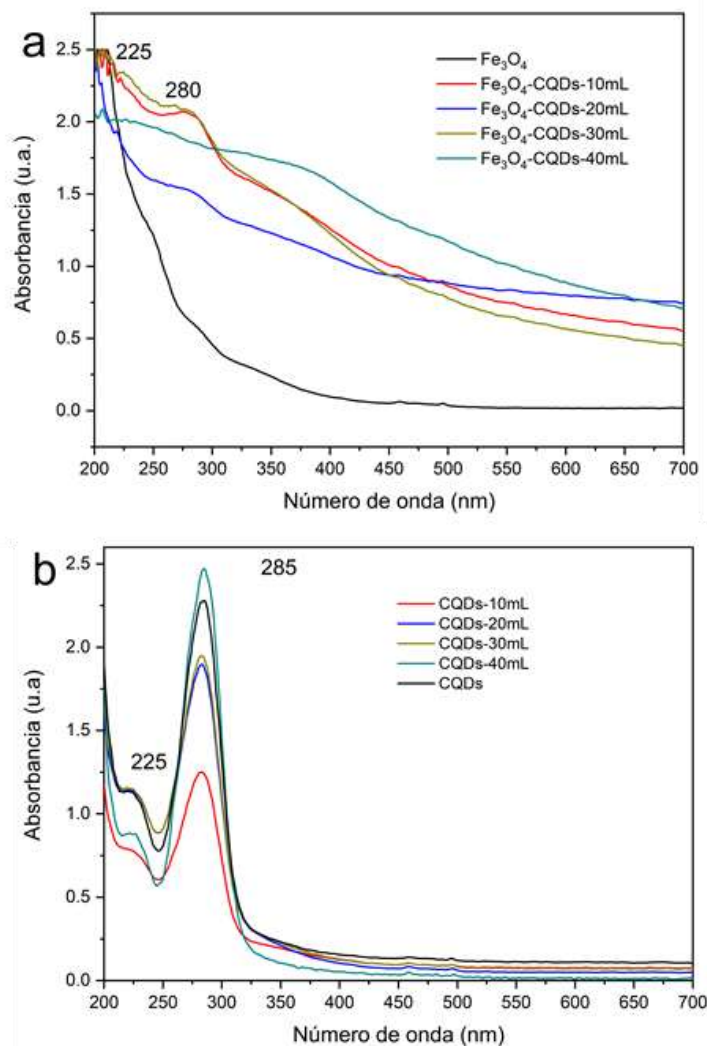


Figura 3. 40. Espectros UV de las muestras de a) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$ y b) L-CQDs .

A partir de los datos de absorción se realizó el cálculo del ancho de E_g mediante el método de Tauc, (**Figura 3.41**). En la Figura 3.41a, correspondiente a las muestras sólidas de $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$, se observan transiciones ópticas visibles con valores de 0.3, 0.5, 1.2 y 1.5 eV, característicos de materiales semiconductores. Estos valores sugieren la generación de nuevos estados electrónicos intermedios derivados de la incorporación de los CQDs en la matriz de Fe_3O_4 , lo que produce una reducción efectiva del E_g y una posible mejora en la respuesta fotoelectrónica del sistema. En ausencia del decorado con CQDs, el Fe_3O_4 presenta

un comportamiento óptico distinto, con un valor de banda prohibida de 3.0 eV, propio de una transición más amplia sin la contribución de estados superficiales de carbono.

Por otra parte, en la Figura 3.41b, correspondiente a las fases líquidas (L-CQDs y CQDs), se obtuvieron valores de E_g de 3.6 y 3.7 eV, respectivamente. En estas muestras no se observan transiciones múltiples como en el caso del Fe_3O_4 -CQDs, lo que indica una estructura más homogénea y una menor densidad de estados intermedios, típica de puntos cuánticos de carbono con superficies pasivadas y un carácter fuertemente confinado.

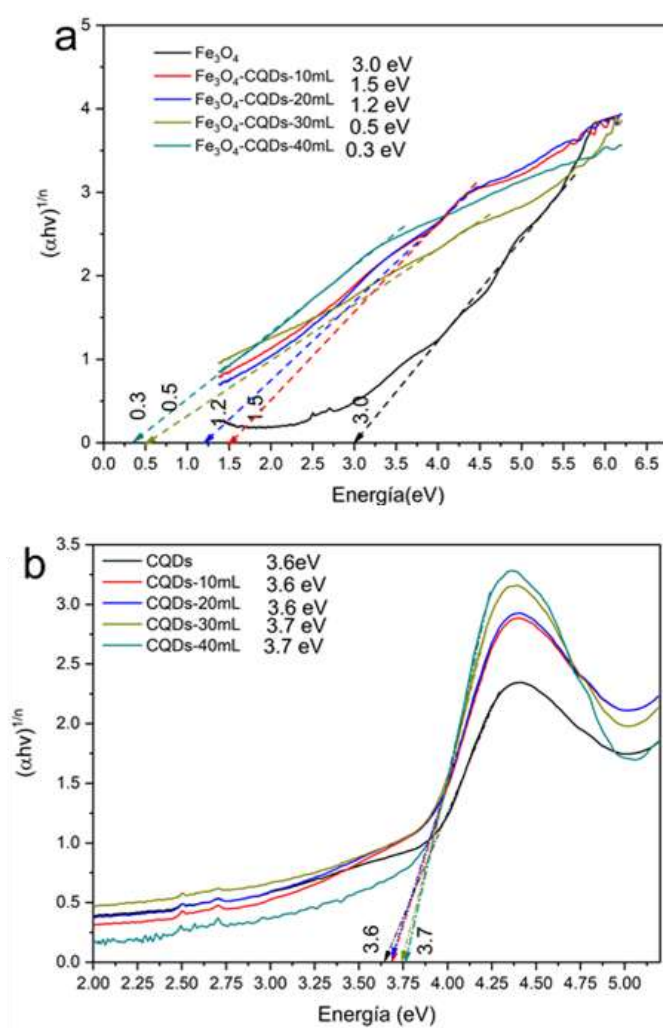


Figura 3. 41. Gráfico de Tauc para el cálculo de banda prohibida de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.

Fotoluminiscencia

Analizando las propiedades de fototuning en las partículas sintetizadas, se realizaron espectros de emisión a diferentes longitudes de onda de excitación (**Figura 3.42**), con el objetivo de evaluar el comportamiento de la fotoluminiscencia en función de la energía de excitación. En la Figura 3.42a, correspondiente al compuesto $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$, se observa una emisión centrada principalmente en la región verde del espectro visible, con máximos definidos alrededor de 535 y 547 nm. Asimismo, se registran señales adicionales en la región del amarillo (590–597 nm), extendiéndose hasta el rojo, lo que sugiere la presencia de centros emisores asociados a defectos superficiales y a estados intermedios generados por la interacción entre la matriz de Fe_3O_4 y los CQDs.

Por otro lado, en la Figura 3.42b, correspondiente a la muestra líquida (L-CQDs), se observa una mayor intensidad de fotoluminiscencia y una distribución de máximos de emisión más amplia, que abarca desde la región del violeta (394 nm), pasando por el azul (461 y 491 nm), hasta el verde (521 y 536 nm), con algunas señales residuales en el rango amarillo–naranja. Este comportamiento evidencia una fuerte dependencia de la emisión con respecto a la longitud de onda de excitación, mostrando un corrimiento gradual hacia el rojo conforme aumenta dicha longitud. Este fenómeno, característico de los CQDs, se asocia a la existencia de múltiples centros emisores y a la dispersión energética de los estados superficiales, alcanzando un máximo de intensidad antes de iniciar un decaimiento progresivo conforme disminuye la energía de excitación.

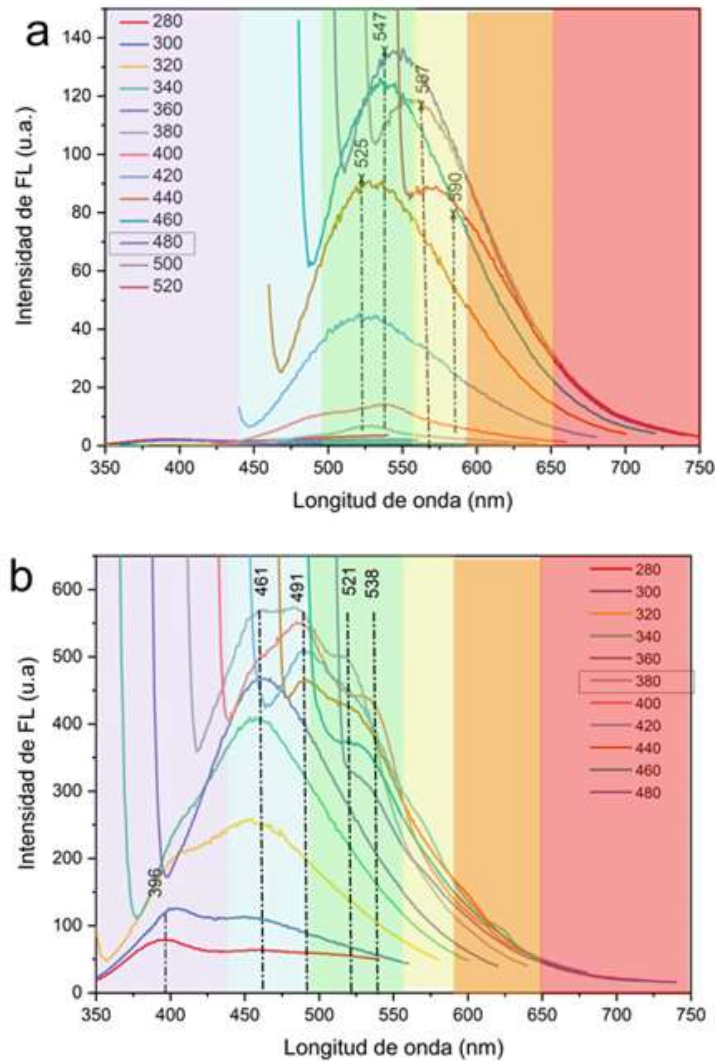


Figura 3. 42. Barrido de diferentes longitudes de onda de excitación para la determinación de las propiedades de phototuning de las muestras de a) Fe₃O₄-CQDs y b) L-CQDs.

Teniendo identificadas las longitudes de excitación óptimas, se obtuvieron los espectros de fotoluminiscencia (**Figura 3.43.**) para las muestras Fe₃O₄-CQDs (a 480 nm) y L-CQDs (a 380 nm). En el apartado a), correspondiente a las muestras decoradas, se observa una emisión dominante en la región verde, con máximos entre 530 y 547 nm. En ausencia de CQDs no se detecta emisión, mientras que la intensidad de luminiscencia aumenta progresivamente hasta la muestra preparada con 20 mL de jugo de sandía, decreciendo posteriormente. La fotografía insertada muestra la respuesta magnética de las partículas al ser expuestas a un imán, lo que indica la presencia de propiedades magnéticas.

En el apartado b), los L-CQDs presentan una mayor intensidad de fotoluminiscencia, con tres máximos principales a 461, 491 y 540 nm, correspondientes a las regiones azul y verde del espectro visible. De forma similar, la intensidad aumenta hasta alcanzar un punto máximo y luego disminuye con el incremento del volumen de jugo. La fotografía insertada muestra las soluciones bajo luz visible, donde se aprecian tonalidades marrones y amarillas; al ser excitadas con luz UV (~ 360 nm), exhiben una emisión azul característica.

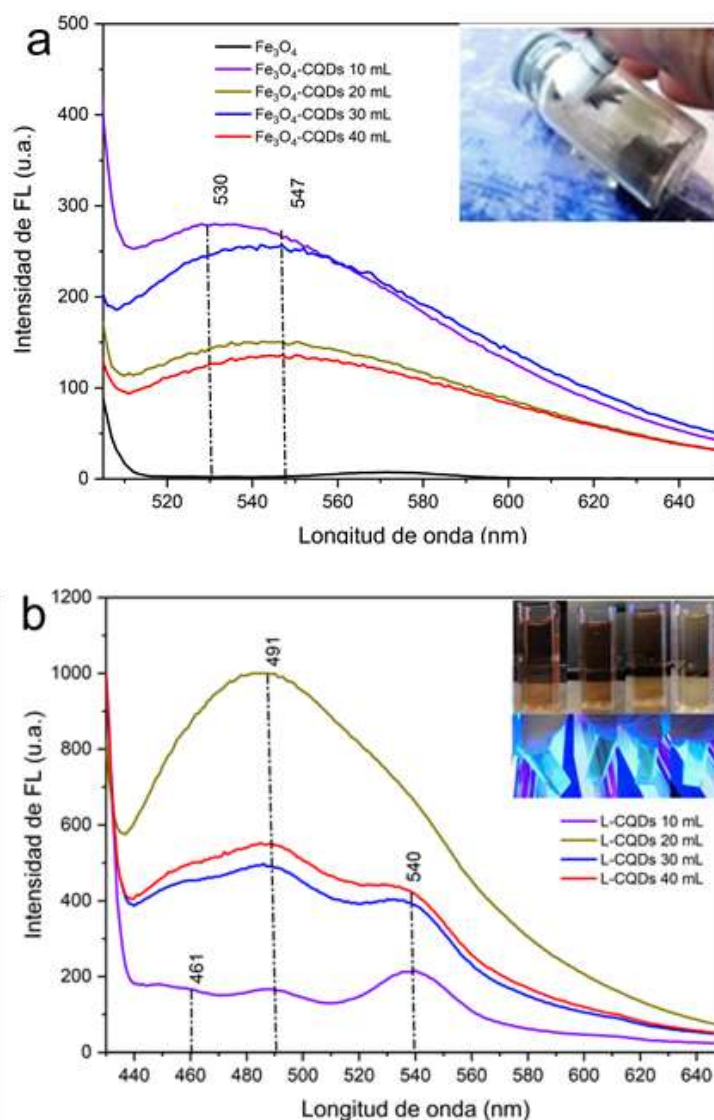


Figura 3. 43. Espectros de fotoluminiscencia de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.

A partir de los datos de fotoluminiscencia y mediante el software *Origin*, se calcularon las coordenadas cromáticas de emisión (**Figura 3.44.**). En ambas gráficas se observa que las emisiones de los materiales se localizan principalmente en las regiones verde y azul del espacio de color CIE 1931. En el apartado a), las coordenadas presentan una ligera dispersión, desplazándose desde una emisión amarilla hacia el verde conforme aumenta el volumen de jugo de sandía. En el apartado b), el desplazamiento es más notorio, avanzando desde la región azul-violeta hacia el verde-azulado. Este cambio es especialmente evidente en las muestras que exhibieron una mayor intensidad de fotoluminiscencia.

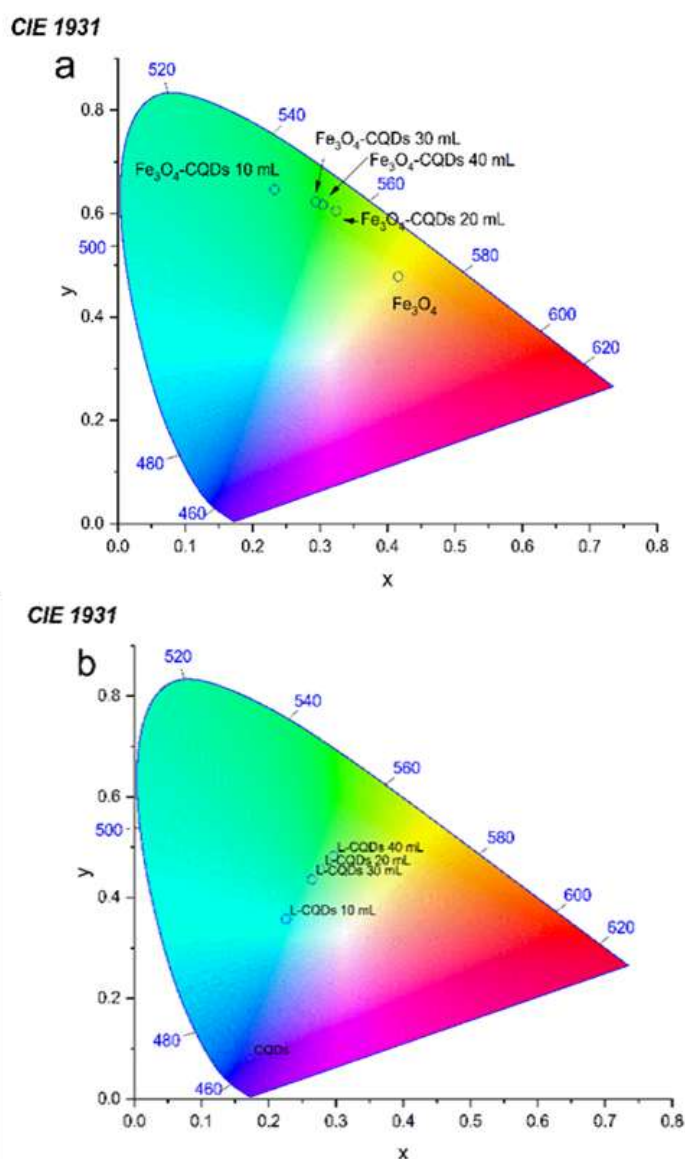


Figura 3. 44. Cálculo de las coordenadas cromáticas de las muestras de a) Fe_3O_4 -CQDs y b) L-CQDs.

3.4.4. Viabilidad celular

La viabilidad celular se evaluó mediante ensayos MTT en la línea celular CP3 para las muestras de Fe_3O_4 (**Figura 3.45.**), tras 24 h (a) y 48 h (b) de exposición. En ambas condiciones, las partículas de Fe_3O_4 sin la presencia de CQDs mostraron una viabilidad superior al 90 % en todas las concentraciones analizadas, evidenciando una buena biocompatibilidad. Con la incorporación de los CQDs se observó una disminución gradual de la viabilidad celular, dependiente tanto del tiempo de exposición como de la concentración de carbono.

A las 24 h, los compuestos con 10 y 20 mL de jugo de sandía mantuvieron una viabilidad superior al 85 %, mientras que las muestras con 30 y 40 mL presentaron una reducción hasta aproximadamente 75 y 70 %, respectivamente. Tras 48 h, la viabilidad celular disminuyó de forma más pronunciada: las muestras con 10 y 20 mL registraron valores por debajo del 80 %, y las de 30 y 40 mL alcanzaron niveles menores al 60 % en concentraciones superiores a 250 y 500 mg/mL.

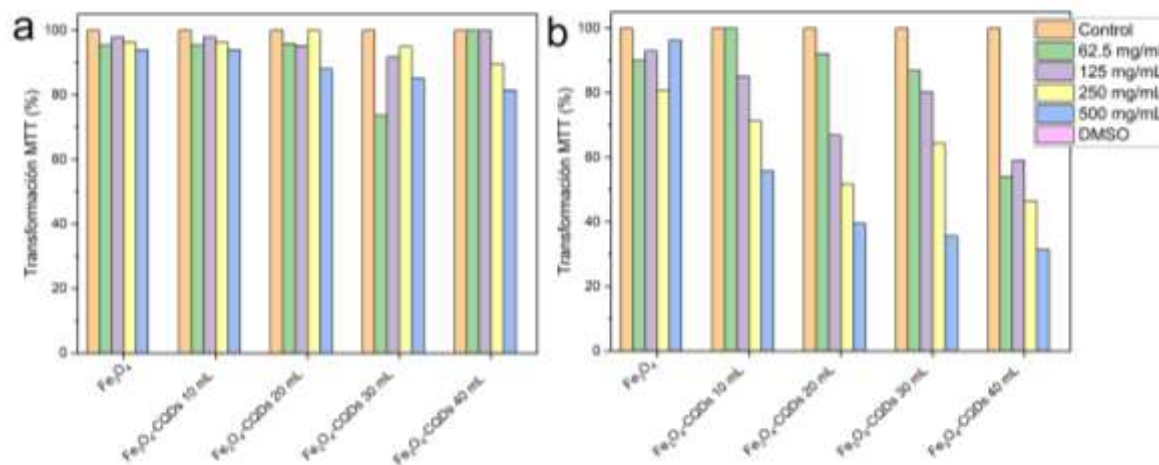


Figura 3. 45. Viabilidad celular en las muestras de Fe_3O_4 -CQDs mediante ensayos MTT en a) 24 h y b) 48 h de incubación.

3.4.5. Generación de imágenes celulares

Las bioimágenes se realizaron utilizando el compuesto Fe_3O_4 -CQDs en células cancerígenas de próstata de la línea CP3, con tiempos de incubación de 2, 12 y 24 horas. Se obtuvieron micrografías en canal de campo claro, canal azul (ex = 355/40 nm; em = 433/36 nm), canal

verde ($\text{ex} = 340/17 \text{ nm}$; $\text{em} = 517/23 \text{ nm}$), así como en canales combinados azul-verde y todos los canales superpuestos (**Figura 3.46.**). A las 2 horas de incubación se observó una población celular homogénea, donde los CQDs comenzaron a internalizarse en las células, evidenciándose fluorescencia intracelular inicial.

Con 24 horas de incubación, se registró un incremento en la intensidad de luminiscencia, indicando una mayor permeabilidad de membrana y metabolismo celular activo. Sin embargo, al extender el tiempo de incubación a 48 horas, se observó una disminución en la intensidad de emisión, lo que sugiere la activación de mecanismos de respuesta celular o el inicio de procesos asociados al estrés celular.

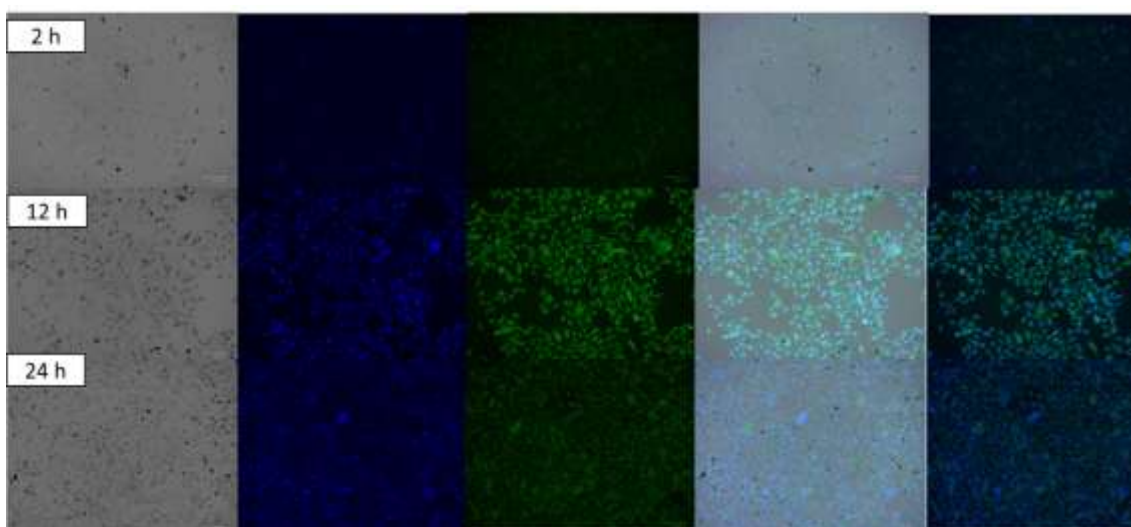


Figura 3. 46. Generación de imágenes celulares con $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$ en tiempos de 2, 12 y 24 h de incubación en campo claro, canal azul, canal verde, canales verde y azul y todos los canales

Capítulo 4.

Discusión

El presente capítulo se analiza los resultados obtenidos para los distintos sistemas estudiados. Se discuten los cambios estructurales, ópticos y morfológicos observados, así como su relación con las condiciones de síntesis y las modificaciones superficiales y estructurales realizadas. Además, se comparan los comportamientos de cada muestra con lo reportado en la literatura, con el fin de comprender las propiedades finales de los materiales.

“Un poco de ciencia nos aleja de Dios, pero mucha ciencia nos devuelve a Él”

-Louis Pasteur

4.1 Síntesis CQDs

La formación de los puntos cuánticos de carbono (CQDs) ocurre principalmente en tres etapas, aunque algunos autores proponen una cuarta correspondiente a la funcionalización superficial con grupos orgánicos [30]. De acuerdo con la literatura, el primer paso consiste en la descomposición química de las moléculas presentes en el precursor, proceso que puede involucrar reacciones de hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, aromatización y recondensación [313]. Posteriormente, según lo citado por Gan et al. [317] se lleva a cabo la formación de pequeños núcleos a través de procesos de polimerización, y bajo las condiciones de temperatura y presión dentro del reactor hidrotermal, ocurre la nucleación final. En el caso de los precursores utilizados, cuya composición incluye principalmente pectina, vitamina C y fructuosa, dichos compuestos se descomponen químicamente mediante procesos de hidrólisis, oxidación y deshidratación, respectivamente, bajo las condiciones de temperatura, presión y pH del tratamiento hidrotermal. Estas transformaciones promueven una polimerización por condensación de alcoholes, dando lugar a pequeños clusters que actúan como núcleos para la formación de nanopartículas esféricas o semiesféricas. El tamaño final de los CQDs depende principalmente de la temperatura alcanzada durante el proceso.

Diversos estudios reportan tamaños distintos de CQDs obtenidos bajo condiciones similares. Por ejemplo, Yang Liu et al., sintetizaron CQDs a partir de jugo de zanahoria mediante el método hidrotermal a 160 °C, obteniendo partículas con diámetros promedio de 5.5 nm y una distribución entre 2 y 8 nm. En contraste, Du et al. emplearon cáscaras de naranja a 220 °C, obteniendo partículas con diámetros entre 1.4 y 3.8 nm, con un tamaño promedio de 2.9 nm [319]. Estos resultados evidencian que la distribución de tamaños de los CQDs depende tanto de la temperatura de tratamiento hidrotermal como de la composición del precursor, ya que algunas moléculas se descomponen o carbonizan a menor temperatura, favoreciendo la grafitización y la formación de las nanopartículas.

Los CQDs reportados en la literatura presentan estructuras amorfas, cuasicristalinas o cristalinas, dependiendo de su grado de grafitización [320]. Estas nanopartículas suelen describirse como núcleos gráficos con hibridaciones sp^2 y sp^3 [12], rodeados por una superficie funcionalizada con grupos oxigenados o nitrogenados, según el precursor

empleado [321]. Las diferencias estructurales pueden observarse mediante difracción de rayos X (DRX), donde se identifican típicamente los planos (002) y (111). Eswaramoorthy et al. señalaron que las variaciones en la posición e intensidad de estos picos se asocian con cambios en el tamaño de cristalito, causados por tensiones y deformaciones en la red [322]. Estas modificaciones también se reflejan en la distancia interplanar [323], atribuibles a la incorporación de átomos de oxígeno en la estructura, lo que da lugar a distintos grados de oxidación en los CQDs.

La espectroscopía Raman constituye otra herramienta útil para el análisis estructural de los CQDs. La relación entre las intensidades de las bandas D y G permite estimar el grado de orden y la cantidad de defectos presentes en las partículas. La banda G corresponde a la red hexagonal característica del grafeno o del grafito, y su mayor intensidad indica un incremento en el orden estructural o en el grado de grafitización. En contraste, la banda D se asocia con defectos en los átomos de carbono, principalmente inducidos por la presencia de grupos oxigenados [324]. Por su parte, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permite identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de los CQDs. En los espectros se observan señales características de los enlaces C=C y O-H, atribuidos a la estructura carbonosa y a la presencia de agua en la dispersión coloidal, respectivamente [325]. Además, pueden detectarse bandas secundarias asociadas a grupos oxigenados o nitrogenados, dependiendo de la composición del precursor [326]. Entre los grupos oxigenados más comunes se encuentran los hidroxilos, carbonilos y carboxilos, mientras que entre los nitrogenados predominan las aminas, amidas y nitrilos. La presencia de estos grupos funcionales superficiales introduce defectos estructurales que influyen directamente en las propiedades ópticas de los CQDs [64].

Los grupos funcionales superficiales desempeñan un papel fundamental en la modulación de las propiedades ópticas de los CQDs. En los espectros de absorción suelen observarse dos bandas principales: una característica de la estructura carbonosa, atribuida a los enlaces C=C, y otra asociada a la oxidación superficial, correspondiente a los enlaces C=O. Estas señales se relacionan con las transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ y $n-\pi^*$, respectivamente [53], [327]. La intensidad de absorción puede vincularse con la densidad de estados electrónicos o con una

mayor concentración de grupos funcionales, lo que refleja un mayor orden estructural durante la formación de los CQDs.

Asimismo, la naturaleza del precursor de carbono influye directamente en la estructura electrónica y en la distribución de los estados energéticos, afectando el grado de grafitización y, por tanto, el valor de la E_g [62]. En los espectros de fotoluminiscencia, los CQDs exhiben un efecto de *phototuning*, y las curvas de emisión presentan una forma asimétrica, lo que sugiere la presencia de múltiples centros emisores con distintos niveles energéticos [122]. Estos centros pueden asociarse a grupos funcionales oxigenados o a defectos estructurales en la red de carbono.

La estructura propuesta de los CQDs (Figura 4.1.) contempla la presencia de enlaces aromáticos C=C, responsables de las transiciones electrónicas $\pi-\pi^*$ (indicadas con flecha roja), y de enlaces C=O, asociados a las transiciones $n-\pi^*$ (flecha azul). Estas transiciones generan defectos en la superficie de las nanopartículas de carbono, que contribuyen a la reducción de la banda prohibida y a la aparición de diferentes niveles energéticos responsables de las propiedades de emisión y del fenómeno de *phototuning*.

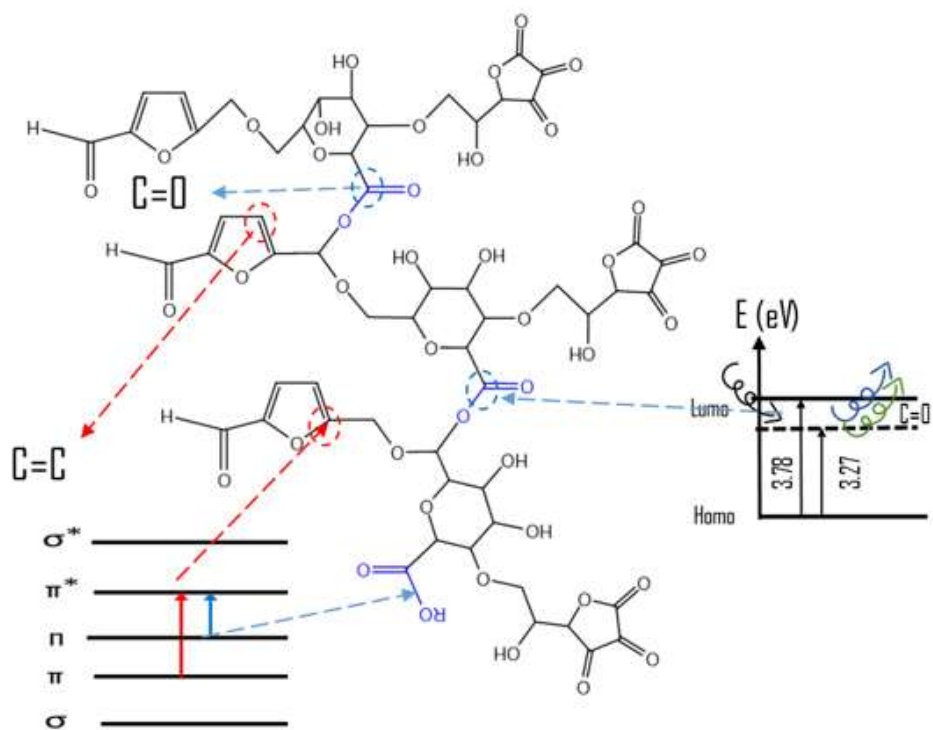


Figura 4. 1. Modelo de la estructura de los CQDs y la generación de transiciones electrónicas.

Este trabajo presenta una contribución significativa al estudio de los CQDs mediante la propuesta de un mecanismo detallado de la formación de estas nanopartículas basadas en precursores específicos con partículas en su composición como la pectina, vitamina C y la fructuosa. A diferencia de estudios previos, el mecanismo de formación abarca una descomposición molecular detalla de las moléculas, para después tener una polimerización por condensación de alcoholes y finalizar con la nucleación, vinculando cada etapa con reacciones químicas específicas. Esta propuesta permite entender como la composición molecular de los precursores influyen en la estructura, morfología y propiedades ópticas de los CQDs. Además, se logró controlar y correlacionar la distribución de tamaños, la grafitización de la estructura carbonosa de los CQDs y la funcionalización superficial con las condiciones hidrotermales utilizadas para la reacción, lo que abre nuevas oportunidades para la optimización racional de estos materiales fotoluminiscentes.

La síntesis de CQDs a partir de los precursores vegetales como la fresa, guayaba, pera, plátano y durazno bajo condiciones controladas dentro de la reacción hidrotermal permitió establecer un mecanismo de formación más coherente y detallado que explica la formación

estructural y óptica de estas nanopartículas. El análisis morfológico, estructural y espectroscópico confirmó la presencia de dominios grafiticos de hibridaciones sp^2 con grupos oxigenados que funcionalizan u oxigena esta estructura. Esta funcionalización incide en las propiedades ópticas como la absorción, el E_g y la fotoluminiscencia.

Se determinó que la composición del precursor y la temperatura de la reacción hidrotermal tienen un papel determinante en la morfología y dispersión de tamaños, mientras que los grupos funcionales en la superficie y estructura que son introducidos durante la síntesis contribuyen al phototuning. Esta investigación establece bases sólidas para futuras investigaciones enfocadas en la personalización en las propiedades ópticas de los CQDs con fines biomédicos resaltando el potencial al ser obtenidos de fuentes vegetales y de bajo costo en la fabricación de nanomateriales funcionales.

4.2 CQDs PEGilados

La imagen TEM de los CQDs confirma la formación de nanopartículas de carbono con morfología esférica. En el caso de los PEG-CQDs, se observa una estructura más agregada con regiones turbias que corresponden al polímero, además de zonas con mayor contraste que sugieren regiones parcialmente grafitizadas y otras de menor contraste asociadas a carbono amorfo [19].

El análisis por FTIR evidencia la presencia de bandas características de los CQDs y PEG-CQDs, confirmando la interacción entre ambos componentes. La atenuación de las señales correspondientes a los grupos OH y C–O, junto con la aparición de nuevas bandas asociadas a C=O y C–O–C tras la incorporación del PEG, indican la formación de enlaces covalentes entre los grupos oxigenados en la superficie de los CQDs y los grupos hidroxilo del polímero. Este enlace químico puede originarse mediante reacciones de acoplamiento o condensación [328], dando lugar a la formación de ésteres (–COO–) y éteres (–O–), como ha sido reportado previamente por Hamley y colaboradores en sistemas similares [329].

Asimismo, el cambio de pH observado sugiere que la modificación superficial está influenciada por el estado de protonación o desprotonación de los grupos funcionales, favoreciendo interacciones adicionales de tipo electrostático o por fuerzas de Van der Waals entre el polímero y los CQDs [330]. Estas modificaciones superficiales repercuten directamente en la estabilidad coloidal y en las propiedades ópticas de las nanopartículas de carbono.

La síntesis a partir de la piña resulta efectiva gracias a su composición química, que incluye moléculas como pectina, vitamina C y fructosa. Estas sustancias, mediante el proceso de carbonización térmica en el método hidrotermal, favorecen la formación de estructuras de carbono con cierto grado de orden gráfico [331], además de la generación de grupos oxigenados confirmados por espectroscopia FTIR. Dichos grupos oxigenados desempeñan un papel clave en la modificación superficial con PEG.

Los resultados de absorción UV-Vis muestran que tanto la concentración de PEG como el pH influyen significativamente en las transiciones electrónicas de los CQDs y PEG-CQDs. La banda secundaria alrededor de 227 nm, asociada a los enlaces C=C de las estructuras

aromáticas y gráficas, corresponde a transiciones electrónicas de tipo π - π^* [332]. Al incrementar la concentración de PEG, se observa una disminución en la intensidad de esta banda, lo que puede atribuirse a un recubrimiento polimérico denso que reduce la conjugación π de los núcleos gráficas, afectando así la absorción característica.

Por otro lado, la banda principal en torno a 285 nm, relacionada con transiciones n - π^* de los grupos carbonílicos ($C=O$) [333], se mantiene en todas las muestras, indicando la presencia de grupos funcionales oxigenados en la estructura y superficie de los CQDs y PEG-CQDs. Sin embargo, la atenuación de esta banda sugiere la formación de enlaces covalentes entre dichos grupos y el PEG. Finalmente, el efecto del pH sobre los PEG-CQDs modifica la absorción óptica debido a los procesos de protonación y desprotonación, los cuales influyen en la dispersión coloidal y en la densidad electrónica del sistema.

Los resultados muestran que la incorporación del PEG y la variación del pH en los CQDs influyen directamente en su estructura electrónica (**Figura 4.2**). Se observa un incremento en la energía de banda prohibida, lo cual puede atribuirse a la formación de enlaces covalentes que introducen niveles energéticos localizados dentro de la banda prohibida, haciendo que los fotones requieran mayor energía para generar transiciones electrónicas. Este fenómeno también puede estar asociado al aumento en el tamaño efectivo de las partículas, resultado de la conjugación y la pasivación superficial, que disminuyen los defectos estructurales y restringen la movilidad de portadores de carga [334]. Por otro lado, el efecto del pH sobre la energía de banda prohibida sugiere una ligera sensibilidad a los procesos de protonación y desprotonación de los grupos funcionales presentes en la superficie [330].

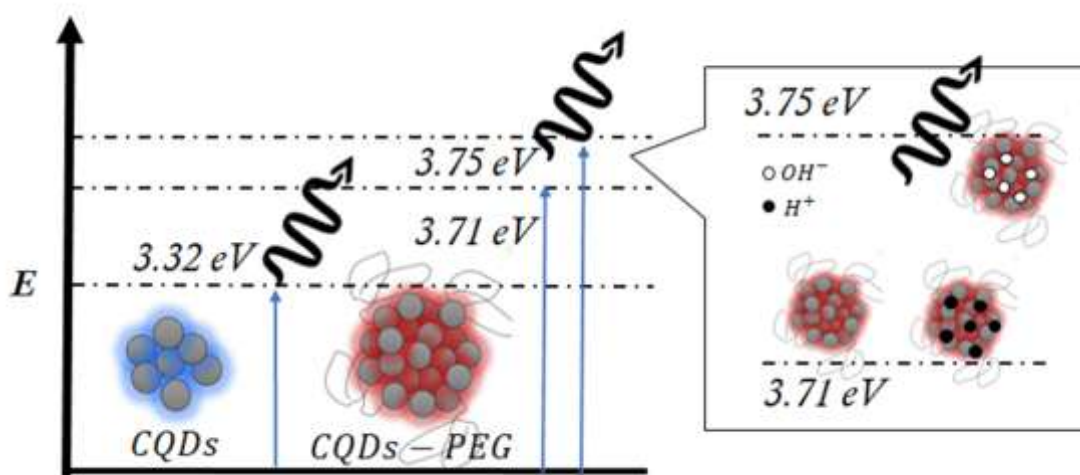


Figura 4. 2. Niveles de energía relacionados al Eg.

El comportamiento dependiente de la excitación observado en ambos casos es característico de los CQDs. Esta propiedad se atribuye a la presencia de múltiples centros emisores con diferentes tamaños, químicas superficiales y defectos estructurales [335] resultado de la combinación entre efectos de confinamiento cuántico y transiciones entre niveles electrónicos. En los espectros de los CQDs se aprecia una distribución heterogénea de tamaños y estados superficiales, con una ventana de emisión concentrada principalmente en la región del violeta, azul y verde, lo que sugiere una estructura relativamente homogénea derivada del proceso de carbonización y nucleación. En los PEG-CQDs, los espectros muestran un corrimiento de la emisión hacia la región del rojo, alcanzando emisiones en el rango del color amarillo. Este desplazamiento puede explicarse por un aumento en la densidad de estados [336], inducido por la funcionalización con PEG que modifica el entorno electrónico de los CQDs.

Por otro lado, al analizar el efecto de la cantidad de PEG, se observa que la presencia del polímero tiende a apagar (quenching) la fluorescencia (**Figura 4.3.**) [46]. Este fenómeno puede atribuirse a la dispersión de los sitios emisores y a la reducción de la agregación de estructuras amorfas, dando lugar a partículas más grandes que restringen los procesos radiativos y, en consecuencia, disminuyen la intensidad de emisión.

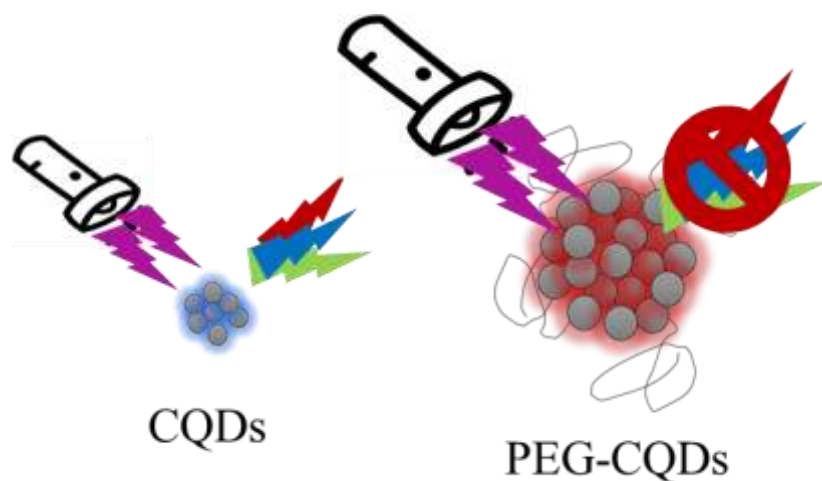


Figura 4. 3. Emisión y pérdida de la luminiscencia por queanching en los CQDs y PEG-CQDs.

En los PEG-CQDs, las condiciones ácidas favorecen una mayor intensidad de emisión. Este comportamiento se debe a que la adición de H_2SO_4 o NaOH provoca la protonación y desprotonación de los grupos funcionales superficiales, generando sitios pasivados que estabilizan los estados emisores y aumentan los canales radiativos (**Figura 4.4..**) [337]. Esta pasivación superficial promueve la formación de huecos y electrones, facilitando la emisión mediante un ajuste en el nivel de Fermi. En cambio, bajo condiciones básicas, el cambio más drástico de pH puede inducir un aumento en los defectos estructurales, lo que reduce la eficiencia de emisión.

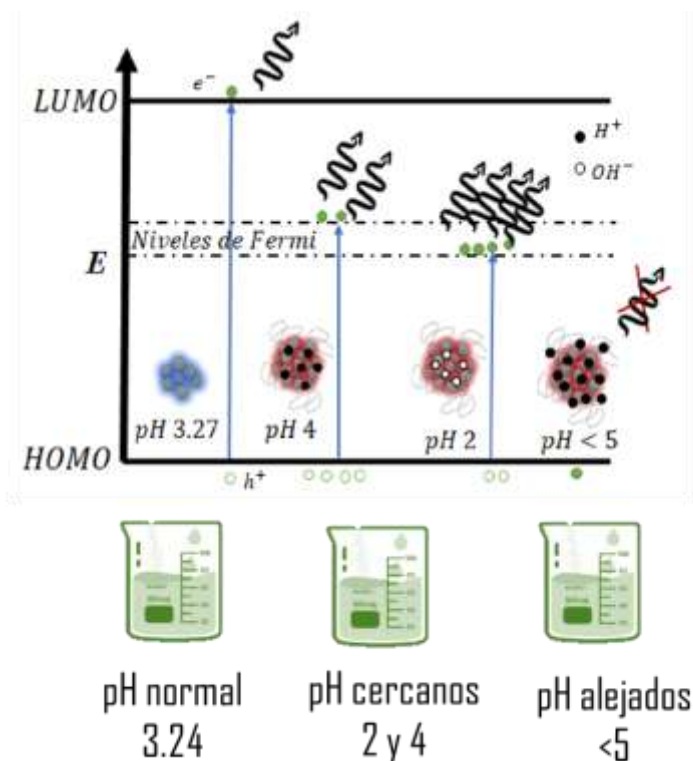


Figura 4. 4, Modelo de niveles de energía de Fermi para el aumento en la intensidad de fotoluminiscencia al cambio de pH.

Este trabajo presenta un enfoque novedoso en la síntesis y funcionalización en dos pasos de CQDs a partir de un precursor natural como la piña (*Ananas comusus*), mediante una reacción hidrotermal y después la incorporación controlada de PEG en diferentes concentraciones y condiciones de pH permitiendo modular las propiedades estructurales y ópticas de los CQDs-PEG, teniendo un comportamiento ajustable en la fotoluminiscencia para una potencial aplicación biomédica. La principal innovación radica en demostrar que la modificación superficial con PEG no solo cambia la morfología y dispersión de las nanopartículas, sino que también cambia significativamente su energía de banda prohibida y comportamiento fotoluminiscente. Esto sugiere que es posible ajustar y controlar la emisión óptica y la estabilidad coloidal de los CQDs mediante la modificación superficial o funcionalización que puede ser aplicable en diferentes áreas como sensores ópticos, imanes biomédicas y sistemas de liberación controlada. Además, de que la síntesis parte de una fuente natural y renovable como la piña fortaleciendo la perspectiva sostenible de la síntesis de nanomateriales funcionales.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la síntesis hidrotermal de los CQDs-PEG utilizando piña (*Ananas comusus*) como fuente precursora de carbono es eficiente y sostenible, teniendo partículas con estructuras esféricas y de tamaños nanométricos. La modificación superficial con el PEG influye en las propiedades estructurales, ópticas y estabilidad coloidal de los CQDs desnudos. Al incrementar la concentración de PEG se abre el ancho de banda prohibida, modificando el comportamiento de absorción y generando un desplazamiento en la emisión de fotoluminiscencia hacia longitudes de onda mayores. Asimismo, el ajuste de pH durante la modificación superficial afecta la intensidad de emisión debido a los fenómenos de protonación/desprotonación los cuales modifican la densidad de estados superficiales. Todos estos resultados validan el potencial de los CQDs-PEG como materiales con propiedades ópticas sintonizables propiedades fundamentales para su aplicación en biomedicina, bioimagen y biosensores, además de sentar las bases para futuras investigaciones sobre la funcionalización superficial y control en las propiedades optoelectrónicas de los nanomateriales basados en carbono.

4.3. CQDs funcionalizados con quitosano

El análisis morfológico muestra que la adición progresiva de quitosano durante la modificación superficial influye directamente en la formación y dispersión de los CQDs dentro del polímero. A concentraciones nulas o bajas (0 y 0.25 g), los CQDs se observan como partículas individuales bien definidas, con una ligera tendencia a la aglomeración o recubrimiento parcial por el polímero. En concentraciones intermedias (0.5 y 0.75 g), se forman aglomerados o recubrimientos parciales, donde aún pueden distinguirse algunos CQDs. Sin embargo, con la máxima concentración de quitosano (1 g) se pierde casi por completo la definición de las nanopartículas de carbono, predominando estructuras más amorfas. Este comportamiento sugiere que el quitosano actúa como una cubierta adicional de carbono, mientras que sus grupos amino y su naturaleza polimérica le permiten funcionar como agente estructurante [338]. A medida que aumenta su concentración, favorece la formación de una matriz carbonosa amorfa que afecta la dispersión de los CQDs.

En cuanto a la caracterización estructural, los CQDs presentan las bandas típicas de estas nanopartículas: una amplia señal en 3300 cm^{-1} atribuida al estiramiento de los grupos OH y a la presencia de agua por la naturaleza higroscópica del material; una banda en 1625 cm^{-1} asociada a las vibraciones de los enlaces C=C en los dominios grafiticos; y otra en 2100 cm^{-1} correspondiente a los grupos carbonílicos (C=O), que confirman la oxidación de la superficie y la estructura grafitica [46]. La incorporación del quitosano introduce nuevas bandas características del polímero (NH₂, C–H y C–O–C) y modifica la intensidad de las señales originales, lo que indica una interacción superficial entre los CQDs y el quitosano [250].

Los resultados de absorbancia y del cálculo de la banda prohibida confirman que la incorporación del quitosano no solo altera la morfología de los CQDs, sino que también modifica sus propiedades electrónicas y ópticas. El incremento en la absorbancia observada en las bandas características se asocia a la contribución del quitosano, cuya estructura contiene grupos carbonilo residuales de unidades parcialmente acetiladas que participan en las transiciones π - π^* [339], [340]. Además, los grupos oxigenados (C=O) y nitrogenados (NH₂), en combinación con los grupos cromóforos de los CQDs, intensifican la absorción en la región visible [341]. La pendiente observada en el espectro visible sugiere una modificación en el comportamiento óptico general de los Ch-CQDs, atribuible a la presencia

de grupos externos que aumentan la densidad de estados electrónicos, facilitando las transiciones inducidas por luz UV y visible [342].

El aumento del valor de la banda prohibida, conocido como “blue shift” [343], puede deberse al efecto de confinamiento cuántico en los CQDs o a la pasivación de defectos superficiales por el quitosano. Esto indica que el polímero no solo influye en la morfología, sino también en la estructura electrónica y las propiedades ópticas de absorción.

La dependencia de la fotoluminiscencia con respecto a la longitud de onda de excitación es una característica típica de los CQDs y puede originarse tanto por una distribución de tamaños como por la presencia de distintos grupos funcionales [95], [96]. El primer efecto se asocia al confinamiento cuántico y el segundo a la aparición de niveles energéticos intermedios entre las bandas de valencia y conducción [18]. Con la incorporación del quitosano, se observa un desplazamiento de los máximos de emisión hacia longitudes de onda más cortas, junto con un incremento notable en la intensidad de emisión. Este comportamiento se atribuye a la pasivación efectiva de los defectos superficiales no radiativos, promovida por los grupos amino (NH_2) y oxhidrilo (OH) del polímero. La similitud en los rangos de emisión de los Ch-CQDs sugiere una distribución relativamente homogénea de los estados emisores en las nanopartículas de carbono.

Los espectros de fotoluminiscencia muestran un aumento significativo en la intensidad de emisión conforme crece la cantidad de quitosano, lo que evidencia una pasivación superficial eficiente de los defectos no radiativos (**Figura 4.5.**) Dicha pasivación es promovida por la coordinación de los grupos funcionales amino y oxhidrilo con los defectos superficiales de los CQDs, reduciendo las recombinaciones no radiativas y aumentando la eficiencia cuántica hasta una concentración óptima cercana a 0.5 g de polímero. Sin embargo, al incrementar aún más la cantidad de quitosano, la saturación de la superficie genera un recubrimiento excesivo que reduce la emisión y, por ende, el rendimiento fotoluminiscente de los Ch-CQDs.

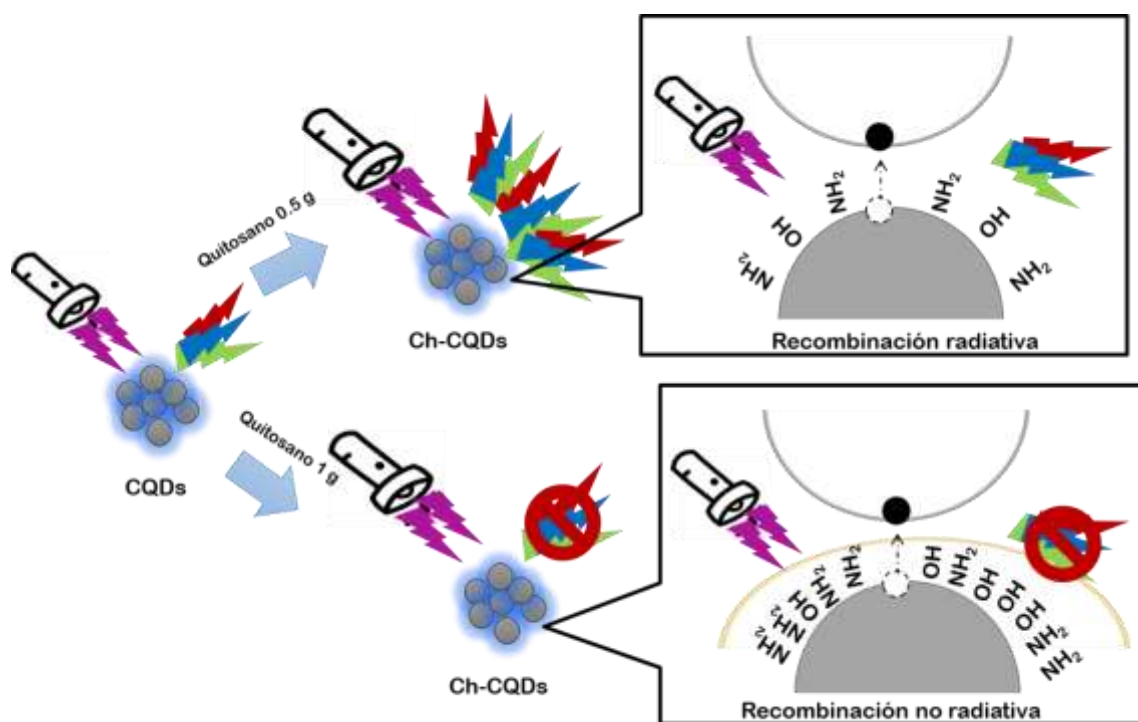


Figura 4. 5. Modelo de la pérdida de luminiscencia al cambio de masa de quitosano al generar o evitar las transiciones radiativas.

Este estudio presenta un enfoque innovador para la síntesis de CQDs a partir de calabaza (*Cucurbita moschata Duchesne*) mediante el método hidrotermal, empleando un precursor vegetal como explorado y de bajo costo. La principal aportación científica radica en la modificación superficial de los CQDs con quitosano, un biopolímero natural con grupos funcionales amino e hidroxilo, permitiendo ajustar sus propiedades estructurales, electrónicas y ópticas. Demostrando que la cantidad de quitosano adicionada modifica significativamente la morfología, la energía de banda prohibida y la fotoluminiscencia de los CQDs, presentando una emisión más intensa y desplazada en el espectro visible con un comportamiento dependiente de la excitación. Esta pasivación superficial no solo mejora las propiedades ópticas al reducir defectos no radiativos, sino que también abre nuevas oportunidades en aplicaciones biofuncionales como sensores ópticos, bioimagen y liberación controlada gracias a la biocompatibilidad y funcionalidad del polímero.

Los resultados obtenidos demuestran que la calabaza (*Cucurbita moschata Duchesne*) es un precursor efectivo para la síntesis de CQDs, los cuales muestran una estructura carbono-

grafítica y tamaños de ≈ 2 nm. La funcionalización o modificación superficial con quitosano afecta de manera directa la morfología, la dispersión y la cobertura superficial de los CQDs, modificando las propiedades ópticas y electrónicas. Se observa que las concentraciones intermedias de quitosano en los Ch-CQD (0.5 g) maximiza la intensidad de luminiscencia, debido a la pasivación eficiente de los defectos superficiales presentes en los CQDs, mientras que las concentraciones mayores disminuyen el rendimiento óptico. El aumento en la energía de banda prohibida y la intensidad de emisión radican en el cambio de confinamiento cuántico y reducción de recombinaciones no radiativas. En conjunto, este trabajo valida el uso de biopolímeros como agentes funcionalizantes para modular las propiedades de CQDs de fuentes vegetales renovables, ampliando su aplicabilidad en tecnologías ambientales y biomédicas.

4.4. Funcionalización con Fe_3O_4

Los resultados confirman que la cantidad de jugo de sandía precursor de los CQDs incorporados durante la síntesis hidrotermal influye directamente en la decoración y modificación superficial de las partículas de Fe_3O_4 . A medida que aumenta el volumen del precursor, se incrementa la cobertura del material magnético por los CQDs. Este tipo de modificación superficial es esencial y ampliamente utilizada para mejorar las propiedades fisicoquímicas de las matrices base [344], ampliando así sus posibles aplicaciones tecnológicas [345]. El análisis del tamaño de partícula evidencia que la incorporación del jugo de sandía y la formación de los CQDs no solo modifican la superficie del Fe_3O_4 , sino que también influyen en su morfología, promoviendo la reducción y estabilización de las partículas [346]. El incremento progresivo del contenido de CQDs durante la síntesis hidrotermal tiene un efecto significativo en la pasivación y decoración superficial, alterando las propiedades electrónicas, ópticas y estructurales del sistema híbrido [25].

Los resultados de difracción de rayos X muestran que la formación de la fase espinela característica de Fe_3O_4 no se ve afectada por la presencia del jugo de sandía, lo que confirma la estabilidad estructural del óxido de hierro en todas las muestras decoradas. Sin embargo, el ligero descenso en la intensidad de los picos de difracción y su ensanchamiento con el incremento del volumen de precursor de carbono sugieren una reducción en el tamaño de cristalito [347], [348], pasando de 20.2 nm en la muestra sin carbono a 10.2 nm en la muestra con el mayor volumen de jugo. Este cambio se atribuye al confinamiento superficial inducido por los CQDs, que promueven un mayor desorden estructural en la superficie del Fe_3O_4 .

En las muestras con bajo contenido de CQDs (L-CQDs) se observa una banda amorfa que indica la presencia de estructuras de carbono desordenado. En contraste, en las muestras con mayor cantidad de jugo aparecen fases secundarias asociadas a la formación de NaCl , producto de la reacción entre los iones Cl^- y Na^+ presentes en la solución acuosa de los CQDs. Estos iones, generados como subproductos durante la síntesis, pueden modificar las propiedades ópticas y de fotoluminiscencia del material [231]. En conjunto, los patrones de difracción de ambas series confirman que la síntesis hidrotermal simultánea permite obtener un sistema híbrido donde coexisten una fase magnética bien definida de Fe_3O_4 y una fase carbonosa con un grado variable de orden estructural, determinado por las condiciones de síntesis, especialmente el volumen del jugo de sandía [349].

Los resultados de espectroscopia FTIR del compuesto $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$ evidencian que la incorporación del jugo de sandía durante la síntesis introduce diversos grupos funcionales ($-\text{OH}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$ y $\text{C}-\text{O}$), lo que confirma una interacción efectiva entre ambas fases [13]. En ausencia de CQDs, el Fe_3O_4 conserva su estructura básica; sin embargo, la aparición de nuevas señales revela una modificación superficial significativa debida a la decoración con las nanopartículas de carbono. La presencia de la señal atribuida a $\text{Fe}-\text{C}-\text{O}$ demuestra una interacción química directa entre el hierro de la magnetita y los grupos orgánicos de los CQDs, lo que sugiere la formación de complejos tipo carboxilato ($\text{Fe}-\text{O}-\text{C}=\text{O}$) [350] o acoplamientos superficiales $\text{Fe}-\text{C}-\text{O}-\text{H}$ mediante enlaces covalentes coordinados o parciales. En las muestras L-CQDs, las bandas características de $-\text{OH}$ y $\text{C}=\text{C}$ confirman la formación de los puntos cuánticos de carbono, mientras que la banda cercana a 550 cm^{-1} se asocia a la interacción del oxígeno superficial de los CQDs con los metales presentes en los precursores (Fe y Na), los cuales podrían incorporarse parcialmente en la estructura de los L-CQDs [351].

Posterior a la síntesis hidrotermal, se identifican distintas interacciones fisicoquímicas (**Figura 4.6.**) entre la fase inorgánica (Fe_3O_4 y los iones Fe^{3+} , Fe^{2+} , Na^+ y Cl^-) y la fase orgánica (CQDs). En las partículas decoradas, la interacción dominante es de tipo químico, principalmente a través de enlaces coordinados $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$ entre los átomos de hierro superficiales del Fe_3O_4 y los grupos funcionales oxigenados ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $\text{C}=\text{O}$) presentes en los CQDs [78], lo que favorece su anclaje químico estable. Este tipo de enlace se corrobora por la aparición de nuevas bandas en los espectros FTIR ($\text{Fe}-\text{O}$, $\text{C}=\text{O}$ y $\text{C}-\text{O}$), las cuales están asociadas a la interacción $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$. Además, los patrones de DRX muestran una ligera disminución de la intensidad y un ensanchamiento de los picos con la presencia de CQDs, lo que indica una reducción del tamaño de cristalito y un incremento del desorden superficial debido al recubrimiento con carbono.

En las partículas coloidales de L-CQDs pueden ocurrir dos mecanismos principales de interacción entre los iones metálicos y los CQDs. El primero consiste en una modificación superficial, donde los iones de hierro se coordinan con los grupos oxigenados de los CQDs formando enlaces del tipo $\text{M}-\text{O}-\text{C}$ o $\text{M}-\text{COO}^-$, fenómeno respaldado por las señales observadas en los espectros FTIR. El segundo mecanismo corresponde a un dopaje

heteroatómico, facilitado por las condiciones hidrotermales, que permiten la inserción parcial de iones metálicos dentro de la red carbonosa [352], [353], ya sea sustituyendo átomos o incorporándose en defectos estructurales, lo cual se refleja en los cambios sutiles de los patrones de DRX.

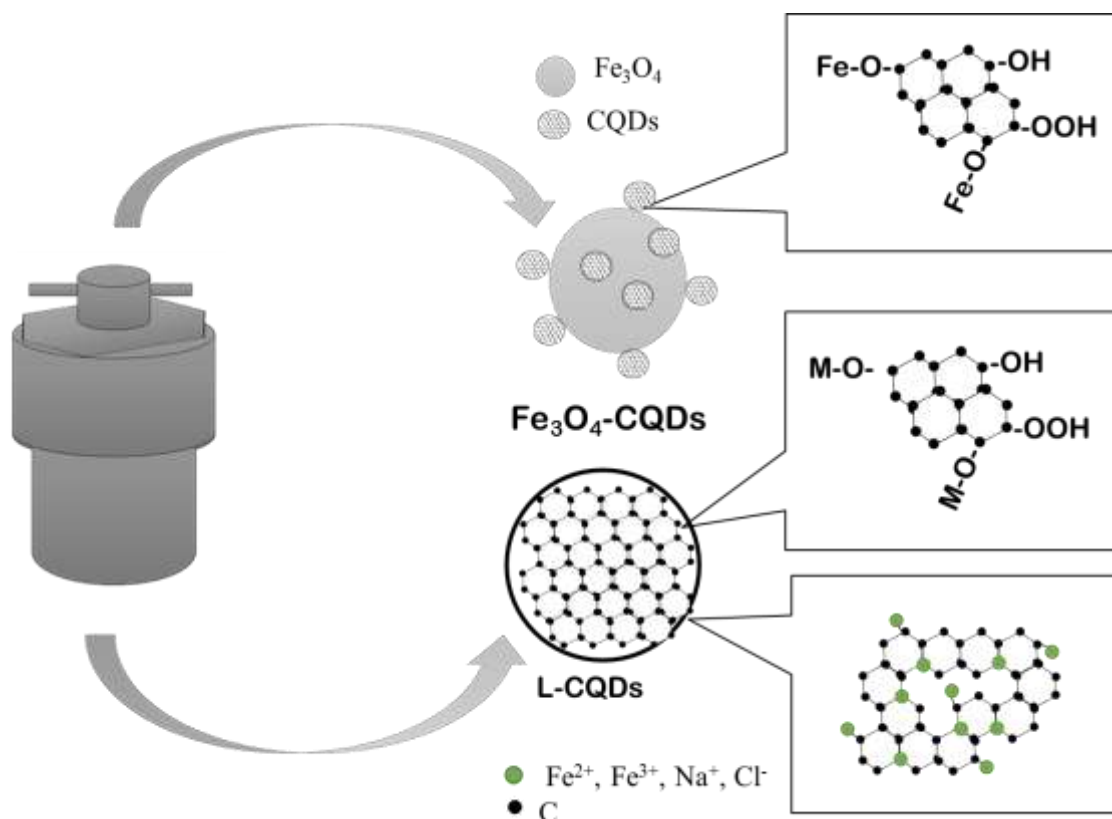


Figura 4. 6. Forma de interacción entre las diferentes partículas por enlaces coordinados y dopaje.

Los espectros UV-Vis obtenidos confirman la incorporación de los CQDs en las muestras de Fe_3O_4 -CQDs, evidenciada por las bandas ubicadas en 225 y 280 nm, atribuidas a las transiciones $\pi-\pi^*$ (enlaces $\text{C}=\text{C}$ de carácter aromático) y $n-\pi^*$ (grupos $\text{C}=\text{O}$), respectivamente, características de los CQDs funcionalizados [46], [354]. En contraste, el Fe_3O_4 puro presenta un espectro con absorciones sin picos definidos. La intensificación de estas bandas en las muestras híbridas sugiere una mayor cobertura superficial, así como una integración e interacción eficientes con los CQDs. Por su parte, los espectros de los L-CQDs también muestran dichas bandas, aunque con un desplazamiento de la señal $n-\pi^*$ hacia los 285 nm, lo que indica un entorno más homogéneo y una menor interacción con el Fe_3O_4 . Este

efecto podría estar asociado con una mayor densidad de defectos superficiales o con diferencias en la polaridad del medio [355].

La variación observada en los valores de energía de banda prohibida (E_g) de las muestras Fe_3O_4 -CQDs demuestra una interacción efectiva entre los CQDs y la superficie de Fe_3O_4 , generando cambios en la densidad local de estados electrónicos inducidos por la incorporación progresiva de las nanopartículas de carbono. Dichas partículas actúan como modificadores electrónicos y ópticos del sistema híbrido [356]. Este comportamiento ha sido reportado en otros sistemas decorados con nanomateriales a base de carbono, donde la presencia de estos reduce la recombinación de portadores y mejora las propiedades electrónicas del material anfitrión [357]. En contraste, los L-CQDs presentan valores de E_g más elevados, atribuibles a su menor tamaño efectivo y a la alta proporción de superficie funcionalizada [358]; no obstante, la presencia de iones en su estructura no modifica significativamente dichos valores..

En las propiedades de fotoluminiscencia se observa que tanto los Fe_3O_4 -CQDs como los L-CQDs presentan una clara dependencia de la emisión con respecto a la longitud de onda de excitación, característica típica de materiales con múltiples centros emisores [94]. Los máximos de emisión en la región azul ($\sim 398\text{--}461\text{ nm}$) y en la región verde ($\sim 462\text{--}550\text{ nm}$) se asocian con transiciones $\pi\text{-}\pi^*$ originadas en los dominios grafiticos de tipo sp^2 , que actúan como pozos cuánticos donde los electrones pueden excitarse y decaer radiativamente, emitiendo luz azul o violeta. Asimismo, las transiciones electrónicas $\text{n-}\pi^*$ provenientes de grupos funcionales oxigenados se originan en orbitales no enlazantes, generando emisiones verdes o amarillas debido a los menores niveles de energía involucrados.

Los desplazamientos hacia el rojo observados con el incremento de la longitud de onda de excitación indican una mayor deslocalización electrónica [359], lo que produce niveles de energía más bajos y, por ende, emisiones a longitudes de onda mayores. Este comportamiento también puede reflejar la influencia de trampas superficiales [95], el acoplamiento con el medio solvente o los efectos asociados al tamaño de las partículas [90].

El análisis de las emisiones muestra que, al alcanzar cierta proporción de incorporación de CQDs sobre la superficie del Fe_3O_4 , así como de iones o átomos dentro de la estructura de

los CQDs, la intensidad de emisión disminuye, evidenciando un efecto de *quenching*. Este fenómeno puede atribuirse a la transferencia electrónica desde los CQDs hacia la superficie del óxido de hierro, así como a la presencia de iones o átomos que actúan como captadores de electrones, favoreciendo procesos de relajación no radiativos que interrumpen la emisión (Figura 4.7.).

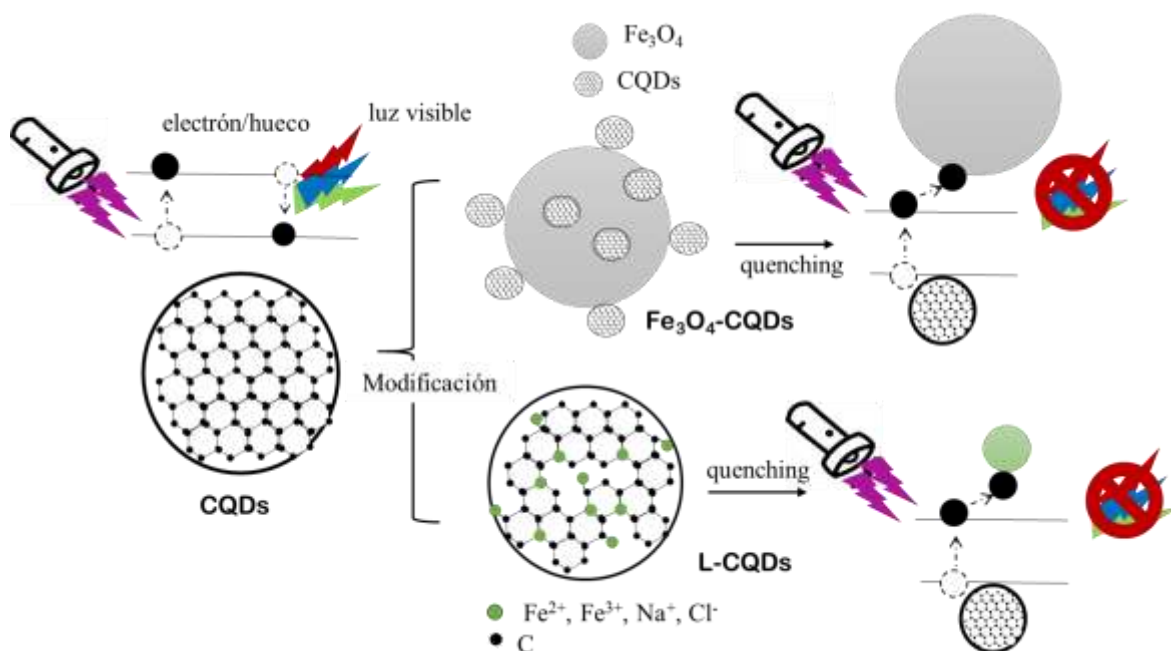


Figura 4. 7. Modelos del cambio en la luminiscencia de las muestras de a) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CQDs}$ y b) L-CQDs .

En cuanto a la eficiencia de emisión, la muestra sintetizada con 20 mL de jugo precursor presentó la máxima intensidad tanto en fase líquida como en fase sólida. Este comportamiento sugiere una configuración estructural óptima, con una mayor pasivación superficial y una densidad adecuada de sitios emisores. En cambio, los volúmenes menores podrían generar partículas subpasivadas, mientras que volúmenes superiores favorecen la formación de defectos que actúan como trampas no radiativas. El análisis cromático muestra que las emisiones se ubican principalmente en la región verde del espectro visible, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en bioimagen y dispositivos optoelectrónicos [360]. Los desplazamientos observados en las longitudes de excitación sugieren modificaciones estructurales asociadas con una mayor densidad de grupos oxigenados o con variaciones en el confinamiento cuántico [361].

En el compuesto Fe_3O_4 -CQDs, la presencia del soporte magnético contribuye a una estabilización espectral, evidenciando una modulación del color hacia una tonalidad verde más definida. Este efecto puede atribuirse a la reducción parcial de defectos superficiales debido a la interacción de los CQDs con la superficie del Fe_3O_4 , la cual actúa como una plataforma pasivante.

Los resultados de los ensayos de viabilidad celular (MTT) indican que el Fe_3O_4 presenta una excelente biocompatibilidad, en concordancia con reportes previos sobre óxidos de hierro con potencial biomédico [20]. Con la incorporación de CQDs, esta viabilidad se modifica, mostrando una respuesta dependiente tanto de la dosis como del tiempo de exposición. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie de los CQDs, los cuales pueden inducir cierto nivel de estrés oxidativo o interferencia metabólica [288]. A medida que aumenta la concentración de jugo de sandía — y, por tanto, la cantidad de CQDs funcionalizados se observa una ligera disminución en la viabilidad, particularmente a las 48 h, lo que sugiere un efecto acumulativo o retardado relevante para aplicaciones prolongadas. Sin embargo, los nanocompuestos Fe_3O_4 -CQDs preparados con 10 y 20 mL mantienen una buena viabilidad celular, lo que indica que la decoración superficial no compromete significativamente la biocompatibilidad, conservando su potencial para aplicaciones biomédicas como agentes fluorescentes o sistemas de liberación controlada.

Las imágenes celulares obtenidas muestran que, a tiempos cortos (2 h), la intensidad de fotoluminiscencia es baja, indicando una interacción limitada entre el compuesto y las células. Conforme transcurre el tiempo, la fluorescencia aumenta, evidenciando la acumulación del compuesto en el citoplasma y la actividad enzimática asociada con células viables [302]. La disminución parcial en la densidad celular podría relacionarse con el efecto citotóxico generado por los grupos oxigenados de los CQDs mediante mecanismos de estrés oxidativo [308]. En conjunto, estas observaciones confirman que los nanocompuestos Fe_3O_4 -CQDs son biocompatibles en periodos cortos y medianos, aunque en exposiciones prolongadas o a concentraciones elevadas deben considerarse posibles efectos citotóxicos leves.

Este trabajo introduce un enfoque integral en la síntesis de un sistema híbrido 2 en 1, un compuesto de una fase sólida de magnetita decorada con CQDs y una fase líquida con L-CQDs en suspensión ambos obtenidos simultáneamente mediante una reacción hidrotermal. El uso de jugo de sandía (*Citrullus lanatus*) como fuente de carbono representa una estrategia sostenible y eficiente para formar nanomateriales funcionalizados con oxígeno. La principal innovación radica en la modulación controlada de la cobertura superficial de Fe_3O_4 con CQDs a través de diferentes volúmenes de jugo precursor, logrando modificar de forma directa las propiedades estructurales, ópticas y biológicas del sistema. Este enfoque no solo permite la sintonización de la energía de banda prohibida y fotoluminiscencia, sino también la introducción de propiedades magnéticas y generación de bioimagen, validando su potencial aplicación como agentes de contraste, seguimiento celular.

La síntesis hidrotermal conjunta de Fe_3O_4 -CQDs y L-CQDs utilizando jugo de sandía (*Citrullus lanatus*) como fuente de carbono permitió obtener materiales funcionales con propiedades ópticas, magnéticas y biológicas altamente versátiles. La decoración progresiva de los Fe_3O_4 con CQDs modificó su morfología, redujo el tamaño de cristalito y generó una pasivación superficial efectiva, teniendo cambios positivos en la fotoluminiscencia. Se observó una fuerte dependencia entre la longitud de onda de excitación y la emisión, con corrimientos hacia el rojo en función del volumen de precursor. Las muestras con 20 mL de jugo presentaron un comportamiento óptimo entre la intensidad de luminiscencia y biocompatibilidad, mientras que en volúmenes mayores redujo la viabilidad celular, por acumulación de grupos funcionales oxigenados que genera un estrés oxidativo. Las imágenes de celulares confirmaron una buena incorporación del compuesto en células vivas a lo largo del tiempo, consolidando a Fe_3O_4 -CQDs como candidatos comprometedores para aplicaciones en medicina, imagenología y sensores biomoleculares.



Conclusiones

“La vida no nos da un propósito. Nosotros le damos propósito a la vida”

-Flash

Conclusiones

Este trabajo demuestra de forma integral que la síntesis de CQDs desnudos a partir de diferentes precursores vegetales es una estrategia viable y sostenible para la obtención de nanomateriales funcionales con propiedades ópticas y estructurales controladas. De los diferentes sistemas de CQDs estudiados se evidenció que:

- El estudio de la CQDs desnudos genera el entendimiento del mecanismo de formación desde la descomposición molecular hasta la nucleación para después tener una pasivación superficial.
- El PEG generando una cobertura superficial que modifica la energía de banda prohibida, regula la emisión y estabilización coloidal.
- El quitosano al actuar como pasivante mejora notablemente la intensidad de emisión debido a la reducción de defectos superficiales no radiativos, aunque su exceso puede inhibir la emisión por saturación estructural.
- La decoración con Fe_3O_4 confiere propiedades magnéticas y genera un sistema híbrido capaz de actuar como un agente de bioimagen, sin comprometer la biocompatibilidad en concentraciones óptimas.

En conjunto, estos hallazgos evidencian que la combinación controlada de precursores, condiciones de síntesis y agentes funcionalizantes permite diseñar CQDs con propiedades específicas para aplicaciones dentro del área biomédica.

Recomendaciones

Expandir estudios de biocompatibilidad: Evaluar con mayor profundidad la citotoxicidad y respuesta celular de los sistemas decorados, sobre todo en tiempos prolongados y diferentes líneas celulares, para validar su uso en medicina personalizada.

Explorar aplicaciones específicas: Realizar pruebas prácticas de los CQDs funcionalizados en sensores fluorescentes, fotocatálisis, detección de metales pesados o liberación de fármacos, con el fin de trasladar estos materiales del laboratorio a un entorno aplicado.

Emplear caracterización avanzada: Incorporar técnicas como XPS, Raman y análisis de tiempo de vida de fotoluminiscencia para obtener una visión más profunda sobre los niveles de dopaje, defectos superficiales y dinámicas electrónicas.



Referencias

“Me levanto cada mañana creyendo que el día de hoy va a ser mejor que ayer”

-Will Smith

Referencias

- [1] L. Cao, M. J. Meziani, S. Sahu, and Y. P. Sun, "Photoluminescence properties of graphene versus other carbon nanomaterials," *Acc. Chem. Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 171–182, 2013, doi: 10.1021/ar300128j.
- [2] X. T. Zheng, A. Ananthanarayanan, K. Q. Luo, and P. Chen, "Glowing graphene quantum dots and carbon dots: Properties, syntheses, and biological applications," *Small*, vol. 11, no. 14, pp. 1620–1636, 2015, doi: 10.1002/sml.201402648.
- [3] B. O. Dabbousi *et al.*, "(CdSe)ZnS Core–Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites," *J. Phys. Chem. B*, vol. 101, no. 46, pp. 9463–9475, 1997, doi: 10.1021/jp971091y.
- [4] N. Wang, Y. Wang, T. Guo, T. Yang, M. Chen, and J. Wang, "Green preparation of carbon dots with papaya as carbon source for effective fluorescent sensing of Iron (III) and Escherichia coli," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 85, pp. 68–75, 2016, doi: 10.1016/j.bios.2016.04.089.
- [5] A. M. Alam, B. Y. Park, Z. K. Ghouri, M. Park, and H. Y. Kim, "Synthesis of carbon quantum dots from cabbage with down- and up-conversion photoluminescence properties: Excellent imaging agent for biomedical applications," *Green Chem.*, vol. 17, no. 7, pp. 3791–3797, 2015, doi: 10.1039/c5gc00686d.
- [6] X. Feng *et al.*, "Easy synthesis of photoluminescent N-doped carbon dots from winter melon for bio-imaging," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 40, pp. 31250–31254, 2015, doi: 10.1039/c5ra02271a.
- [7] H. Ding, Y. Ji, J. S. Wei, Q. Y. Gao, Z. Y. Zhou, and H. M. Xiong, "Facile synthesis of red-emitting carbon dots from pulp-free lemon juice for bioimaging," *J. Mater. Chem. B*, vol. 5, no. 26, pp. 5272–5277, 2017, doi: 10.1039/c7tb01130j.
- [8] S. Sahu, B. Behera, T. K. Maiti, and S. Mohapatra, "Simple one-step synthesis of highly luminescent carbon dots from orange juice: Application as excellent bio-imaging agents," *Chem. Commun.*, vol. 48, no. 70, pp. 8835–8837, 2012, doi: 10.1039/c2cc33796g.
- [9] V. N. Mehta, S. Jha, H. Basu, R. K. Singhal, and S. K. Kailasa, "One-step hydrothermal approach to fabricate carbon dots from apple juice for imaging of mycobacterium and fungal cells," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 213, pp. 434–443, 2015, doi: 10.1016/j.snb.2015.02.104.
- [10] C. A. Zamora-Valencia, M. I. Reyes-Valderrama, A. J. Herrera-Carbajal, E. Salinas-Rodriguez, and V. Rodriguez-Lugo, "Evaluación de la luminiscencia de puntos cuánticos de carbono sintetizados mediante el método hidrotermal a partir de triticum," vol. 7, pp. 19–22, 2019.
- [11] L. Cao *et al.*, "Formation mechanism of carbon dots: From chemical structures to fluorescent behaviors," *Carbon N. Y.*, vol. 194, pp. 42–51, 2022, doi: 10.1016/j.carbon.2022.03.058.
- [12] M. L. Liu, B. Bin Chen, C. M. Li, and C. Z. Huang, "Carbon dots: Synthesis, formation mechanism, fluorescence origin and sensing applications," *Green Chem.*, vol. 21, no. 3, pp. 449–471, 2019, doi: 10.1039/c8gc02736f.
- [13] C. A. Zamora-Valencia, M. I. Reyes-Valderrama, D. E. Salado-Lesa, and V. Rodriguez-Lugo, "Síntesis hidrotermal de puntos cuánticos de carbono PEGilados," *Pädi Boletín Científico Ciencias Básicas e Ing. del ICBI*, vol. 11, no. Especial5, pp. 35–43, 2023, doi: 10.29057/icbi.v11iespecial5.11840.

- [14] B. Bin Chen, M. L. Liu, C. M. Li, and C. Z. Huang, "Fluorescent carbon dots functionalization," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 270, pp. 165–190, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.06.008>.
- [15] Y. Liu *et al.*, "Ostwald ripening inhibition by a bipolar ligand achieves long-term-reaction and scalable synthesis of ultra-stable CsPbX₃ perovskite quantum dots towards LEDs," *Chem. Eng. J.*, vol. 498, no. July, p. 155515, 2024, doi: [10.1016/j.cej.2024.155515](https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155515).
- [16] Z. Xu, Y. Wang, J. Zhuang, Y. Li, and L. Jia, "High temperature hydrothermal etching of g-C₃N₄ for synthesis of N doped carbon quantum dots-supported CdS photocatalyst to enhance visible light driven hydrogen generation," *Mol. Catal.*, vol. 517, Jan. 2022, doi: [10.1016/j.mcat.2021.111900](https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111900).
- [17] Y. Dong *et al.*, "Carbon-based dots co-doped with nitrogen and sulfur for high quantum yield and excitation-independent emission," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 52, no. 30, pp. 7800–7804, Jul. 2013, doi: [10.1002/anie.201301114](https://doi.org/10.1002/anie.201301114).
- [18] F. Hashemzadeh *et al.*, "Adsorptive removal of anthracene from water by biochar derived amphiphilic carbon dots decorated with chitosan," *Chemosphere*, vol. 352, p. 141248, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141248>.
- [19] H. Li, C. Wang, X. Li, Y. Han, and Y. Zhang, "Facile synthesis of PEG-modified fluorescent carbon dots for highly sensitive detection of Ag⁺," *Dye. Pigment.*, vol. 219, no. July, p. 111534, 2023, doi: [10.1016/j.dyepig.2023.111534](https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111534).
- [20] M. Padmaja, P. Shyamala, V. D. Praveena, and G. Tejaswini, "Green synthesized Fe₃O₄@CD nanocomposites using Acacia caesia leaves: In vitro biological properties and cytotoxicity assessment," *Next Nanotechnol.*, vol. 6, p. 100093, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2024.100093>.
- [21] Y. P. Sun, *Carbon dots: Exploring carbon at zero-dimension*. Springer International Publishing, 2020. doi: [10.1007/978-3-030-41184-8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41184-8).
- [22] N. Yang, X. Jiang, and D.-W. Pang, "Carbon Nanostructures Carbon Nanoparticles and Nanostructures." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8633>
- [23] M. A. Reed, J. N. Randall, R. J. Aggarwal, R. J. Matyi, T. M. Moore, and A. E. Wetsel, "Observation of discrete electronic states in a zero-dimensional semiconductor nanostructure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 60, no. 6, pp. 535–537, Feb. 1988, doi: [10.1103/PhysRevLett.60.535](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.535).
- [24] J. Zhang and S. H. Yu, "Carbon dots: large-scale synthesis, sensing and bioimaging," *Mater. Today*, vol. 19, no. 7, pp. 382–393, 2016, doi: [10.1016/j.mattod.2015.11.008](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.008).
- [25] J. Wang, Y. H. Ng, Y.-F. Lim, and G. W. Ho, "Vegetable-extracted carbon dots and their nanocomposites for enhanced photocatalytic H₂ production," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 83, pp. 44117–44123, 2014, doi: [10.1039/C4RA07290A](https://doi.org/10.1039/C4RA07290A).
- [26] A. S. Rasal *et al.*, "Carbon quantum dots: Classification-structure-property-application relationship for biomedical and environment remediation," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 533, p. 216510, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216510>.
- [27] J. Vinoth Kumar, G. Kavitha, R. Arulmozhi, V. Arul, and N. Abirami, "Cyan color-emitting nitrogen-functionalized carbon nanodots (NFCNDs) from Indigofera tinctoria and their catalytic reduction of organic dyes and fluorescent ink applications," *RSC Adv.*, vol. 11, no. 44, pp. 27745–27756, 2021, doi: [10.1039/D1RA04351J](https://doi.org/10.1039/D1RA04351J).
- [28] W.-S. Kuo *et al.*, "Single-sized N-functionality graphene quantum dot in tunable dual-modality near infrared-I/II illumination detection and photodynamic therapy under

- multiphoton nonlinear excitation,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 241, p. 115648, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115648>.
- [29] C. Kang, S. Tao, F. Yang, and B. Yang, “Aggregation and luminescence in carbonized polymer dots,” *Aggregate*, vol. 3, no. 2, p. e169, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/agt2.169>.
 - [30] C. Xia, S. Zhu, T. Feng, M. Yang, and B. Yang, “Evolution and Synthesis of Carbon Dots: From Carbon Dots to Carbonized Polymer Dots,” *Adv. Sci.*, vol. 6, no. 23, p. 1901316, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201901316>.
 - [31] H. Sun, L. Wu, W. Wei, and X. Qu, “Recent advances in graphene quantum dots for sensing,” *Mater. Today*, vol. 16, no. 11, pp. 433–442, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.10.020>.
 - [32] J. Shen, Y. Zhu, X. Yang, and C. Li, “Graphene quantum dots: Emergent nanolights for bioimaging, sensors, catalysis and photovoltaic devices,” *Chem. Commun.*, vol. 48, no. 31, pp. 3686–3699, 2012, doi: 10.1039/c2cc00110a.
 - [33] W. Su *et al.*, “Carbon dots: A booming material for biomedical applications,” *Materials Chemistry Frontiers*, vol. 4, no. 3. Royal Society of Chemistry, pp. 821–836, Mar. 01, 2020. doi: 10.1039/c9qm00658c.
 - [34] C. Hu, M. Li, J. Qiu, and Y. P. Sun, “Design and fabrication of carbon dots for energy conversion and storage,” *Chemical Society Reviews*, vol. 48, no. 8. Royal Society of Chemistry, pp. 2315–2337, Apr. 21, 2019. doi: 10.1039/c8cs00750k.
 - [35] Y. Li, P. Miao, W. Zhou, X. Gong, and X. Zhao, “N-doped carbon-dots for luminescent solar concentrators,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 40, pp. 21452–21459, 2017, doi: 10.1039/c7ta05220k.
 - [36] H. Wang *et al.*, “Nitrogen-doped carbon dots for ‘green’ quantum dot solar cells,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, 2016, doi: 10.1186/s11671-016-1231-1.
 - [37] H. Li, R. Liu, S. Lian, Y. Liu, H. Huang, and Z. Kang, “Near-infrared light controlled photocatalytic activity of carbon quantum dots for highly selective oxidation reaction,” *Nanoscale*, vol. 5, no. 8, pp. 3289–3297, Apr. 2013, doi: 10.1039/c3nr00092c.
 - [38] X. Chen, X. Sui, S. Lu, Y. Qu, T. Liu, and T. Wang, “Preparation of carbon dots-based nanoparticles and their research of bioimaging and targeted antitumor therapy,” *J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater.*, vol. 110, no. 1, pp. 220–228, Jan. 2022, doi: 10.1002/jbm.b.34905.
 - [39] H. Huang *et al.*, “One-pot green synthesis of nitrogen-doped carbon nanoparticles as fluorescent probes for mercury ions,” *RSC Adv.*, vol. 3, no. 44, pp. 21691–21696, 2013, doi: 10.1039/c3ra43452d.
 - [40] Y. Guo, Z. Wang, H. Shao, and X. Jiang, “Hydrothermal synthesis of highly fluorescent carbon nanoparticles from sodium citrate and their use for the detection of mercury ions,” *Carbon N. Y.*, vol. 52, pp. 583–589, 2013, doi: 10.1016/j.carbon.2012.10.028.
 - [41] Q. Zeng *et al.*, “Carbon dots as a trackable drug delivery carrier for localized cancer therapy: In vivo,” *J. Mater. Chem. B*, vol. 4, no. 30, pp. 5119–5126, 2016, doi: 10.1039/c6tb01259k.
 - [42] Q. Wang *et al.*, “Hollow luminescent carbon dots for drug delivery,” *Carbon N. Y.*, vol. 59, pp. 192–199, 2013, doi: 10.1016/j.carbon.2013.03.009.
 - [43] J. Zhou *et al.*, “Carbon dots doped with heteroatoms for fluorescent bioimaging: a review,” *Microchimica Acta*, vol. 184, no. 2. Springer-Verlag Wien, pp. 343–368, Feb.

- 01, 2017. doi: 10.1007/s00604-016-2043-9.
- [44] F. ALLAMBERGENOVA *et al.*, “Synthesis of carbon dots based on chitosan and melamine and their application in detecting vanadate (V) anions,” *Chinese J. Anal. Chem.*, vol. 53, no. 7, p. 100538, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjac.2025.100538>.
 - [45] D. Jessy Mercy, V. Kiran, A. Thirumalai, K. Harini, K. Girigoswami, and A. Girigoswami, “Rice husk assisted carbon quantum dots synthesis for amoxicillin sensing,” *Results Chem.*, vol. 6, p. 101219, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101219>.
 - [46] C. A. Zamora-Valencia, M. I. Reyes-Valderrama, L. Escobar-Alarcón, V. Garibay-Febles, and V. Rodríguez-Lugo, “Effect of Concentration and pH on the Photoluminescent Properties of CQDs Obtained from *Actinidia deliciosa*,” *Crystals*, vol. 15, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.3390/cryst15030206.
 - [47] H. Yu, X. Zuo, X. Zhang, X. Wang, and F. Zhou, “Bioinspired carbon quantum dots nanofluid fabricated by a facile two-step synthesis toward high performance lubrication,” *Chem. Eng. J.*, vol. 510, p. 161810, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161810>.
 - [48] S. K. Kalifathullah, S. Alaguvel, and D. Sundaramurthy, “Efficient synthesis of green nitrogen-doped carbon dots as a versatile nanoprobe for antibacterial, cytotoxic, in-vitro imaging, and anti-counterfeit applications,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 178, p. 114473, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114473>.
 - [49] Á. J. García-Salcedo, L. Á. Giraldo-Pinto, D. J. Márquez-Castro, and L. Tirado-Mejía, “Influence of synthesis parameters on the optical properties of carbon dots,” *Carbon Trends*, vol. 17, p. 100403, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100403>.
 - [50] H. Zhao *et al.*, “Facile synthesis of silver nanoparticles/carbon dots for a charge transfer study and peroxidase-like catalytic monitoring by surface-enhanced Raman scattering,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 410, pp. 42–50, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.049>.
 - [51] T. Nasiriani, S. Javanbakht, A. Shaabani, and F. Kazeminava, “Gelatin-based carbon quantum dot-molecularly imprinted polymer: Safe photoluminescent core-shell nano-carrier for the pH-responsive anticancer drug delivery,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 278, p. 134669, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134669>.
 - [52] F. D. de Menezes *et al.*, “Graphene quantum dots unraveling: Green synthesis, characterization, radiolabeling with ^{99m}Tc, in vivo behavior and mutagenicity,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 102, pp. 405–414, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.058>.
 - [53] G. K. Yogesh, E. P. Shuaib, P. Roopmani, M. B. Gumpu, U. M. Krishnan, and D. Sastikumar, “Synthesis, characterization and bioimaging application of laser-ablated graphene-oxide nanoparticles (nGOs),” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 104, no. October 2019, p. 107733, 2020, doi: 10.1016/j.diamond.2020.107733.
 - [54] P. C. Ricardo, G. Nicolodelli, and M. C. Fredel, “Tunable photoluminescence of graphene quantum dots synthesized via laser ablation in ethanol,” *J. Lumin.*, vol. 281, p. 121186, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2025.121186>.
 - [55] Q. Zhao *et al.*, “Electrochemical synthesis of carbon dots with blue and deep red fluorescence and room temperature phosphorescence via surface state regulation of covalency,” *Chem. Eng. J.*, vol. 511, p. 161986, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161986>.

- [56] K. Jian, L. Fu, Y. Zhang, H. Zhang, X. Guo, and X. Zhao, "Microwave synthesis of chitosan-based carbon dots for Al³⁺ detection and biological application," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 260, p. 129413, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129413>.
- [57] H. Yuncu, H. Nadaroglu, and E. Bozkurt, "Eco-friendly synthesis of Carbon Quantum Dots (CQDs) from hazelnut husk for sensitive Aflatoxin B1 (AFB1) detection," *Toxicol. Reports*, vol. 13, p. 101824, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101824>.
- [58] P. Venugopalan and N. Vidya, "Microwave-assisted green synthesis of carbon dots derived from wild lemon (*Citrus pennivesiculata*) leaves as a fluorescent probe for tetracycline sensing in water," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 286, p. 122024, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.122024>.
- [59] A. Benny, P. G. Joemol, A. Sajeewan, and T. Siju Thomas, "Green synthesis and characterization of carbon dots from *Angiopteris evecta* (G.Forst.) Hoffm and selective detection of Fe³⁺ ions," *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.031>.
- [60] Y.-S. Lee, C.-C. Hu, and T.-C. Chiu, "Electrochemical synthesis of fluorescent carbon dots for the selective detection of chlortetracycline," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 3, p. 107413, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107413>.
- [61] S. Kang, H. Han, K. Lee, and K. M. Kim, "Ultrasensitive Detection of Fe³⁺ Ions Using Functionalized Graphene Quantum Dots Fabricated by a One-Step Pulsed Laser Ablation Process," *ACS Omega*, vol. 7, no. 2, pp. 2074–2081, Jan. 2022, doi: [10.1021/acsomega.1c05542](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05542).
- [62] M. P. Romero *et al.*, "One-Pot Microwave-Assisted Synthesis of Carbon Dots and in vivo and in vitro Antimicrobial Photodynamic Applications," *Front. Microbiol.*, vol. Volume 12-2021, 2021, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2021.662149>
- [63] S. Min, P. Ezati, and J.-W. Rhim, "Gelatin-based packaging material incorporated with potato skins carbon dots as functional filler," *Ind. Crops Prod.*, vol. 181, p. 114820, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114820>.
- [64] J. Guo *et al.*, "Green Synthesis of Carbon Dots toward Anti-Counterfeiting," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 1566–1572, Jan. 2020, doi: [10.1021/acssuschemeng.9b06267](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06267).
- [65] X. Ma, S. Li, V. Hessel, L. Lin, S. Meskers, and F. Gallucci, "Synthesis of luminescent carbon quantum dots by microplasma process," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 140, pp. 29–35, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.04.017>.
- [66] H. Lim, Y. Liu, H. Y. Kim, and D. I. Son, "Facile synthesis and characterization of carbon quantum dots and photovoltaic applications," *Thin Solid Films*, vol. 660, pp. 672–677, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.04.019>.
- [67] J. Joseph and A. A. Anappara, "White-Light-Emitting Carbon Dots Prepared by the Electrochemical Exfoliation of Graphite," *ChemPhysChem*, vol. 18, no. 3, pp. 292–298, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/cphc.201601020>.
- [68] H. Miao, L. Wang, Y. Zhuo, Z. Zhou, and X. Yang, "Label-free fluorimetric detection of CEA using carbon dots derived from tomato juice," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 86, pp. 83–89, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.06.043>.
- [69] A. Kaczmarek, A. Wisniewska, T. Mościcki, and J. Hoffman, "The Luminescence of

- Laser-Produced Carbon Nanodots: The Effect of Aggregation in PEI Solution,” *Materials (Basel)*., vol. 17, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/ma17071573.
- [70] K. Surana, P. Pansari, R. Sharma, B. Bhattacharya, S. S. Soni, and G. Durga, “Controlled carbon dots mixing boosts perylene diimide dye for enhanced absorbance and white light emission: Finding application in optoelectronic devices,” *Opt. Mater. (Amst)*., vol. 161, p. 116789, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116789>.
- [71] H. Zhu, H. Zhang, and Y. Xia, “Planar Is Better: Monodisperse Three-Layered MoS₂ Quantum Dots as Fluorescent Reporters for 2,4,6-Trinitrotoluene Sensing in Environmental Water and Luggage Cases,” *Anal. Chem.*, vol. 90, no. 6, pp. 3942–3949, Mar. 2018, doi: 10.1021/acs.analchem.7b04893.
- [72] S. Sangam *et al.*, “Sustainable synthesis of single crystalline sulphur-doped graphene quantum dots for bioimaging and beyond,” *Green Chem.*, vol. 20, no. 18, pp. 4245–4259, 2018, doi: 10.1039/c8gc01638k.
- [73] T. Yuan *et al.*, “Carbon quantum dots: An emerging material for optoelectronic applications,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 7, no. 23. Royal Society of Chemistry, pp. 6820–6835, 2019. doi: 10.1039/c9tc01730e.
- [74] Z. Wang *et al.*, “53% Efficient Red Emissive Carbon Quantum Dots for High Color Rendering and Stable Warm White-Light-Emitting Diodes,” *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 37, Oct. 2017, doi: 10.1002/adma.201702910.
- [75] A. P. Demchenko and M. O. Dekaliuk, “Novel fluorescent carbonic nanomaterials for sensing and imaging,” *Methods and Applications in Fluorescence*, vol. 1, no. 4. IOP Publishing Ltd, Dec. 01, 2013. doi: 10.1088/2050-6120/1/4/042001.
- [76] H. Li *et al.*, “Water-soluble fluorescent carbon quantum dots and photocatalyst design,” *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 49, no. 26, pp. 4430–4434, Jun. 2010, doi: 10.1002/anie.200906154.
- [77] P. Patsalas, S. Kaziannis, C. Kosmidis, D. Papadimitriou, G. Abadias, and G. A. Evangelakis, “Optimized pulsed laser deposition by wavelength and static electric field control: The case of tetrahedral amorphous carbon films,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 12, 2007, doi: 10.1063/1.2745445.
- [78] S. Ahmadian-Fard-Fini, M. Salavati-Niasari, and D. Ghanbari, “Hydrothermal green synthesis of magnetic Fe₃O₄-carbon dots by lemon and grape fruit extracts and as a photoluminescence sensor for detecting of E. coli bacteria,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 203, pp. 481–493, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.021>.
- [79] X. Da *et al.*, “Preparation of multicolor carbon dots with high fluorescence quantum yield and application in white LED,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 794, p. 139497, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139497>.
- [80] M.-J. Cho and S.-Y. Park, “Carbon-dot-based ratiometric fluorescence glucose biosensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 282, pp. 719–729, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.055>.
- [81] M. Alafeef, I. Srivastava, T. Aditya, and D. Pan, “Carbon Dots: From Synthesis to Unraveling the Fluorescence Mechanism,” *Small*, vol. 20, no. 4, p. 2303937, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/smll.202303937>.
- [82] V. G. Reshma and P. V Mohanan, “Quantum dots: Applications and safety consequences,” *J. Lumin.*, vol. 205, pp. 287–298, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.09.015>.
- [83] H. Ding, S.-B. Yu, J.-S. Wei, and H.-M. Xiong, “Full-Color Light-Emitting Carbon

- Dots with a Surface-State-Controlled Luminescence Mechanism,” *ACS Nano*, vol. 10, no. 1, pp. 484–491, Jan. 2016, doi: 10.1021/acsnano.5b05406.
- [84] Y. H. Yuan *et al.*, “Synthesis of nitrogen-doping carbon dots with different photoluminescence properties by controlling the surface states,” *Nanoscale*, vol. 8, no. 12, pp. 6770–6776, 2016, doi: 10.1039/C6NR00402D.
 - [85] E. George, M. Meerajanaky, M. Sunny, D. Shinoy, A. Krishnan, and M. Kurian, “Synthesis and characterisation of waste biomass derived carbon dot decorated zinc nanoferrites,” *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.074>.
 - [86] Y. Cao, H. Hao, L. Chen, and Y. Yang, “Recent advances of carbon dot-based memristors: Mechanisms, devices, and applications,” *Appl. Mater. Today*, vol. 36, p. 102032, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.102032>.
 - [87] L. Zhu, L. Mei, Y. Xuan, and F. Wang, “Machine learning assisted paper-based fluorescent sensor array with metal-doped multicolor carbon quantum dots for identification and inactivation of bacteria,” *Talanta*, vol. 293, p. 128035, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128035>.
 - [88] S. Mohandoss *et al.*, “Rare-earth metal-doped orange emissive photoluminescent carbon quantum dots for highly sensitive detection of Hg²⁺ ions: Multi-color imaging and real samples,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 317, p. 118236, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118236>.
 - [89] Y. Zhao, L. Yu, Y. Deng, K. Peng, Y. Yu, and X. Zeng, “A multi-color carbon quantum dots based on the coordinated effect of quantum size and surface defects with green synthesis,” *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 11, Part A, pp. 16647–16651, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.025>.
 - [90] L. Zhu, H. Wu, S. Xie, H. Yang, and D. Shen, “Multicolor lignin-derived carbon quantum dots: Controllable synthesis and photocatalytic applications,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 662, p. 160126, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160126>.
 - [91] Y. Wang, C. Liang, C. Li, and X. Hu, “Investigation of the luminescence mechanism of multi-color nitrogen-doped carbon quantum dots and their application in the detection of Fe³⁺,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 153, p. 115620, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115620>.
 - [92] J. Li and X. Ma, “Preparation of lignin-based full-color carbon quantum dots and their multifunctionalization with waterborne polyurethanes,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 265, p. 130860, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130860>.
 - [93] X. Ma and J. Li, “Preparation of multicolor carbon quantum dots by hydrothermal method and their functionalization applications,” *J. Lumin.*, vol. 266, p. 120296, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.120296>.
 - [94] X. Hao, Q. Yang, C. Liu, and P. Yang, “Reaction-time-controlled carbon dots nanoarchitectonics with stable and bright photoluminescence for white light emission,” *Dye. Pigment.*, vol. 219, p. 111594, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111594>.
 - [95] K. Kasinathan, S. Samayanan, K. Marimuthu, and J.-H. Yim, “Green synthesis of multicolour fluorescence carbon quantum dots from sugarcane waste: Investigation of mercury (II) ion sensing, and bio-imaging applications,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 601, p. 154266, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154266>.
 - [96] W. E. Mahmoud, “Synthesis and characterization of highly emission multicolored carbon quantum dots,” *Micro and Nanostructures*, vol. 169, p. 207340, 2022, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.micrna.2022.207340>.

- [97] C. Wang, J. Xu, H. Li, and W. Zhao, “Tunable multicolour S/N co-doped carbon quantum dots synthesized from waste foam and application to detection of Cr³⁺ ions,” *Luminescence*, vol. 35, no. 8, pp. 1373–1383, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.3901>.
- [98] Y. Zhang, X. Zhang, Y. Shi, C. Sun, N. Zhou, and H. Wen, “The synthesis and functional study of multicolor nitrogen-doped carbon dots for live cell nuclear imaging,” *Molecules*, vol. 25, no. 2, 2020, doi: 10.3390/molecules25020306.
- [99] J. Manioudakis *et al.*, “Effects of nitrogen-doping on the photophysical properties of carbon dots,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 7, no. 4, pp. 853–862, 2019, doi: 10.1039/C8TC04821E.
- [100] A. G. Suárez, “Trabajo Fin de Máster DETERMINACIÓN DE RENDIMIENTOS CUÁNTICOS DE FLUORESCENCIA POR MÉTODOS INDIRECTOS,” 2015.
- [101] D. Kandi, S. Mansingh, A. Behera, and K. Parida, “Calculation of relative fluorescence quantum yield and Urbach energy of colloidal CdS QDs in various easily accessible solvents,” *J. Lumin.*, vol. 231, p. 117792, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117792>.
- [102] M. Asha Jhonsi and S. Thulasi, “A novel fluorescent carbon dots derived from tamarind,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 661, pp. 179–184, 2016, doi: 10.1016/j.cplett.2016.08.081.
- [103] M. Grabolle, M. Spieles, V. Lesnyak, N. Gaponik, A. Eychmüller, and U. Resch-Genger, “Determination of the Fluorescence Quantum Yield of Quantum Dots: Suitable Procedures and Achievable Uncertainties,” *Anal. Chem.*, vol. 81, no. 15, pp. 6285–6294, Aug. 2009, doi: 10.1021/ac900308v.
- [104] D. M. Alzate, R. Rodríguez, and C. A. Sierra, “RENDIMIENTO CUÁNTICO DE FLUORESCENCIA EN SISTEMAS FENILVINILIDENO FLUORESCENCE QUANTUM YIELD IN PHENYLENEVINYLENE SYSTEMS RENDIMIENTO QUÂNTICO DE FLUORESCENCIA EM SISTEMAS FENILVINILIDENOS Orgánica y Bioquímica.”
- [105] J. Singh, M. Bhattu, M. Verma, S. K. Brar, and R. Jadeja, “Solvent-engineered carbon dots from rice straw for selective fluorescent detection of Cr(VI) and Pb(II),” *J. Mol. Struct.*, vol. 1338, p. 142253, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142253>.
- [106] A. Alqahtani, T. Alqahtani, A. Al Fatease, and A. A. Almrasy, “Development and validation of a graphene quantum dot-based sensor for abacavir quantification via fluorescence quenching,” *Anal. Biochem.*, vol. 701, p. 115817, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2025.115817>.
- [107] Z. Yan *et al.*, “A highly selective and sensitive ‘on–off’ fluorescent probe for detecting cadmium ions and l-cysteine based on nitrogen and boron co-doped carbon quantum dots††Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: 10.1039/d1ra08219a,” *RSC Adv.*, vol. 12, no. 13, pp. 8202–8210, 2022, doi: <https://doi.org/10.1039/d1ra08219a>.
- [108] G. Liu *et al.*, “Efficient luminescent solar concentrators based on solvent polarity induced multiple-colored carbon dots,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 685, pp. 774–782, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.01.196>.
- [109] P. Yu, X. Wen, Y.-R. Toh, and J. Tang, “Temperature-Dependent Fluorescence in Carbon Dots,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, no. 48, pp. 25552–25557, Dec. 2012, doi:

10.1021/jp307308z.

- [110] J. Li, G. Xiang, L. He, X. Jiang, and R. Zhao, "Synthesis of B, N-co-doped carbon dots with high quantum yield for the selective detection of hydrogen peroxide and ascorbic acid in food samples," *Microchem. J.*, vol. 209, p. 112828, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112828>.
- [111] M. You *et al.*, "Full-color room-temperature phosphorescent carbon dots with ultrahigh quantum yield via conjugation regulation," *Chem. Eng. J.*, vol. 505, p. 159246, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159246>.
- [112] L. Wang, B. Wang, S. Lu, S. Lv, and X. Qu, "High quantum yield yellow emission carbon dots for the construction of blue light blocking films," *Chinese Chem. Lett.*, vol. 36, no. 2, p. 110497, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2024.110497>.
- [113] Y. Liu *et al.*, "Perylenedioic Acid-Derived Carbon Dots with Near 100% Quantum Yield in Aqueous Solution for Lasing and Lighting," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 34, no. 36, p. 2401353, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202401353>.
- [114] Q. Fu *et al.*, "White carbon dots with high quantum yield and multicolor carbon dots synthesized by the microwave method in one step," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 38, p. 101178, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101178>.
- [115] M. Lei *et al.*, "Surface state modulation of blue-emitting carbon dots with high quantum yield and high product yield," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 42, pp. 27431–27441, 2022, doi: [10.1039/D2RA05623B](https://doi.org/10.1039/D2RA05623B).
- [116] X. Pang *et al.*, "Non-doped and non-modified carbon dots with high quantum yield for the chemosensing of uric acid and living cell imaging," *Anal. Chim. Acta*, vol. 1199, p. 339571, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339571>.
- [117] Y. Wu, G. Ma, A. Zhang, W. Gu, J. Wei, and R. Wang, "Preparation of Carbon Dots with Ultrahigh Fluorescence Quantum Yield Based on PET Waste," *ACS Omega*, vol. 7, no. 42, pp. 38037–38044, Oct. 2022, doi: [10.1021/acsomega.2c05324](https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05324).
- [118] I. Alkian, H. Sutanto, and Hadiyanto, "Quantum yield optimization of carbon dots using response surface methodology and its application as control of Fe³⁺ ion levels in drinking water," *Mater. Res. Express*, vol. 9, no. 1, Jan. 2022, doi: [10.1088/2053-1591/ac3f60](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac3f60).
- [119] Z. Yi *et al.*, "High quantum yield photoluminescent N-doped carbon dots for switch sensing and imaging," *Talanta*, vol. 222, p. 121663, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121663>.
- [120] Y. Li *et al.*, "Carbon dots as light converter for plant photosynthesis: Augmenting light coverage and quantum yield effect," *J. Hazard. Mater.*, vol. 410, p. 124534, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124534>.
- [121] M. Azizi *et al.*, "Synthesis of Self-Targeted Carbon Dot with Ultrahigh Quantum Yield for Detection and Therapy of Cancer," *ACS Omega*, vol. 5, no. 38, pp. 24628–24638, Sep. 2020, doi: [10.1021/acsomega.0c03215](https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03215).
- [122] L. Tong *et al.*, "One-Step Fabrication of Functional Carbon Dots with 90% Fluorescence Quantum Yield for Long-Term Lysosome Imaging," *Anal. Chem.*, vol. 92, no. 9, pp. 6430–6436, May 2020, doi: [10.1021/acs.analchem.9b05553](https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b05553).
- [123] Y. Han *et al.*, "Machine-Learning-Driven Synthesis of Carbon Dots with Enhanced Quantum Yields," *ACS Nano*, vol. 14, no. 11, pp. 14761–14768, Nov. 2020, doi: [10.1021/acsnano.0c01899](https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01899).
- [124] N. Sharma, A. Sharma, and H.-J. Lee, "Direct fluorescence quenching based detection of indomethacin drug in biological fluids using carbon dots derived from waste Myrica

- esculenta seeds,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 2, p. 115745, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115745>.
- [125] S. Jayaweera, K. Yin, and W. J. Ng, “Nitrogen-Doped Durian Shell Derived Carbon Dots for Inner Filter Effect Mediated Sensing of Tetracycline and Fluorescent Ink,” *J. Fluoresc.*, vol. 29, no. 1, pp. 221–229, 2019, doi: 10.1007/s10895-018-2331-3.
- [126] Y. Wang and A. Hu, “Carbon quantum dots: Synthesis, properties and applications,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 2, no. 34, pp. 6921–6939, 2014, doi: 10.1039/c4tc00988f.
- [127] S. Zhao *et al.*, “Green Synthesis of Bifunctional Fluorescent Carbon Dots from Garlic for Cellular Imaging and Free Radical Scavenging,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 31, pp. 17054–17060, 2015, doi: 10.1021/acsami.5b03228.
- [128] Y. Song *et al.*, “Investigation from chemical structure to photoluminescent mechanism: A type of carbon dots from the pyrolysis of citric acid and an amine,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, no. 23, pp. 5976–5984, Jun. 2015, doi: 10.1039/c5tc00813a.
- [129] L. Bao *et al.*, “Electrochemical tuning of luminescent carbon nanodots: From preparation to luminescence mechanism,” *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 48, pp. 5801–5806, 2011, doi: 10.1002/adma.201102866.
- [130] J. Schneider *et al.*, “Molecular fluorescence in citric acid-based carbon dots,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 121, no. 3, pp. 2014–2022, Jan. 2017, doi: 10.1021/acs.jpcc.6b12519.
- [131] S. Y. Lim, W. Shen, and Z. Gao, “Carbon quantum dots and their applications,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 1, pp. 362–381, 2015, doi: 10.1039/c4cs00269e.
- [132] J. Robertson and E. P. O’reilly, “Electronic and atomic structure of amorphous carbon.”
- [133] P. Zuo, X. Lu, Z. Sun, Y. Guo, and H. He, “A review on syntheses, properties, characterization and bioanalytical applications of fluorescent carbon dots,” *Microchim. Acta*, vol. 183, no. 2, pp. 519–542, 2016, doi: 10.1007/s00604-015-1705-3.
- [134] J. Shen, Y. Zhu, C. Chen, X. Yang, and C. Li, “Facile preparation and upconversion luminescence of graphene quantum dots,” *Chem. Commun.*, vol. 47, no. 9, pp. 2580–2582, Feb. 2011, doi: 10.1039/c0cc04812g.
- [135] G. Redondo-Fernandez, J. Cigales Canga, A. Soldado, J. Ruiz Encinar, and J. M. Costa-Fernandez, “Functionalized heteroatom-doped carbon dots for biomedical applications: A review,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 1284, p. 341874, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341874>.
- [136] J. Wang, Y. Yang, and X. Liu, “Solid-state fluorescent carbon dots: quenching resistance strategies, high quantum efficiency control, multicolor tuning, and applications,” *Mater. Adv.*, vol. 1, no. 9, pp. 3122–3142, 2020, doi: <https://doi.org/10.1039/d0ma00632g>.
- [137] H. Lu, W. Li, H. Dong, and M. Wei, “Graphene Quantum Dots for Optical Bioimaging,” *Small*, vol. 15, no. 36. Wiley-VCH Verlag, Sep. 01, 2019. doi: 10.1002/smll.201902136.
- [138] X. Xu *et al.*, “Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 126, no. 40, pp. 12736–12737, 2004, doi: 10.1021/ja040082h.
- [139] H. B. Ahmed, M. M. Mikhail, M. El-Shahat, and H. E. Emam, “Clustering of carbon quantum dots from polysaccharides (Cellulose, Alginate, Chitosan) versus heterocyclic compounds: Synthesis, characterization and medical applications,” *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 9, p. 100738, 2025, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100738>.

- [140] A. Imran *et al.*, “A comprehensive review on carbon dot synthesis and food applications,” *J. Agric. Food Res.*, vol. 21, p. 101847, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101847>.
- [141] L. Cui, X. Ren, M. Sun, H. Liu, and L. Xia, “Carbon dots: Synthesis, properties and applications,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 12. MDPI, Dec. 01, 2021. doi: 10.3390/nano11123419.
- [142] A. K. Sharma and P. Vats, “Evaluation of biochemical and molecular polymorphism in extended spectrum β -lactamases of Mycobacterium tuberculosis clinical isolates,” *Indian J. Tuberc.*, vol. 66, no. 1, pp. 92–98, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijtb.2018.04.012>.
- [143] S. Fathi-karkan *et al.*, “Green carbon dots and theranostic applications,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 108, p. 106861, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2025.106861>.
- [144] S. Thakur, A. Bains, K. Sridhar, R. Kaushik, P. Chawla, and M. Sharma, “Valorization of food industrial waste: Green synthesis of carbon quantum dots and novel applications,” *Chemosphere*, vol. 347, p. 140656, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140656>.
- [145] Z. Yan, J. Shu, Y. Yu, Z. Zhang, Z. Liu, and J. Chen, “Preparation of carbon quantum dots based on starch and their spectral properties,” *Luminescence*, vol. 30, no. 4, pp. 388–392, Jun. 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.2744>.
- [146] L. Zhang, X. Yang, Z. Yin, and L. Sun, “A review on carbon quantum dots: Synthesis, photoluminescence mechanisms and applications,” *Luminescence*, vol. 37, no. 10, pp. 1612–1638, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.4351>.
- [147] A. Sharma and J. Das, “Small molecules derived carbon dots: synthesis and applications in sensing, catalysis, imaging, and biomedicine,” *J. Nanobiotechnology*, vol. 17, no. 1, p. 92, 2019, doi: 10.1186/s12951-019-0525-8.
- [148] J. Shang, Q. Zhou, K. Wang, and Y. Wei, “Engineering of Green Carbon Dots for Biomedical and Biotechnological Applications,” *Molecules*, vol. 29, no. 18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Sep. 01, 2024. doi: 10.3390/molecules29184508.
- [149] Y. Wan *et al.*, “Facile and green synthesis of fluorescent carbon dots from the flowers of *Abelmoschus manihot* (Linn.) Medicus for sensitive detection of 2,4,6-trinitrophenol and cellular imaging,” *Microchem. J.*, vol. 148, pp. 385–396, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.05.026>.
- [150] H. Luo *et al.*, “Structural evolution of carbon dots during low temperature pyrolysis,” *Nanoscale*, 2022, doi: 10.1039/D1NR07015K.
- [151] N. Tejwan *et al.*, “Synthesis of green carbon dots as bioimaging agent and drug delivery system for enhanced antioxidant and antibacterial efficacy,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 139, p. 109317, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109317>.
- [152] A. U. Khan *et al.*, “Advancements in the green synthesis of carbon dots for sustainable development,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 41, p. e01004, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01004>.
- [153] D. Cai *et al.*, “Biomass-derived carbon dots: synthesis, modification and application in batteries,” *Chem. Sci.*, vol. 16, no. 12, pp. 4937–4970, 2025, doi: 10.1039/D4SC08659G.

- [154] L. Zhang *et al.*, “Carbon dots recovery from waste streams of hydrothermal process,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 194, p. 107589, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107589>.
- [155] L.-Y. Meng, B. Wang, M.-G. Ma, and K.-L. Lin, “The progress of microwave-assisted hydrothermal method in the synthesis of functional nanomaterials,” *Mater. Today Chem.*, vol. 1–2, pp. 63–83, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2016.11.003>.
- [156] C. Xia *et al.*, “The Formation Mechanism of Carbonized Polymer Dots: Crosslinking-Induced Nucleation and Carbonization,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 63, no. 44, p. e202410519, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/anie.202410519>.
- [157] L. Cao *et al.*, “Formation mechanism of carbon dots: From chemical structures to fluorescent behaviors,” *Carbon N. Y.*, vol. 194, pp. 42–51, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.058>.
- [158] P. Li *et al.*, “Formation and fluorescent mechanism of red emissive carbon dots from o-phenylenediamine and catechol system,” *Light Sci. Appl.*, vol. 11, no. 1, p. 298, 2022, doi: [10.1038/s41377-022-00984-5](https://doi.org/10.1038/s41377-022-00984-5).
- [159] Y. Hu and A. Bianco, “Unraveling the synthesis-structure-property relationship in aromatic amino acids-derived carbon dots,” *Carbon N. Y.*, vol. 235, p. 120073, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120073>.
- [160] P. Caramazana, P. Dunne, M. Gimeno-Fabra, J. McKechnie, and E. Lester, “A review of the environmental impact of nanomaterial synthesis using continuous flow hydrothermal synthesis,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 12, pp. 57–62, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.016>.
- [161] G. Bijoy and D. Sangeetha, “Biomass derived carbon quantum dots as potential tools for sustainable environmental remediation and eco-friendly food packaging,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, no. 5, p. 113727, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113727>.
- [162] P. Ezati *et al.*, “Preparation and characterization of B, S, and N-doped glucose carbon dots: Antibacterial, antifungal, and antioxidant activity,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 32, p. e00397, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00397>.
- [163] S. J. Mohammed, M. K. Sidiq, H. H. Najmuldeen, K. F. Kayani, D. A. Kader, and S. B. Aziz, “A comprehensive review on nitrogen-doped carbon dots for antibacterial applications,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, no. 6, p. 114444, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114444>.
- [164] S. Gao, P. Zhang, L. Xu, H. Lian, and C. Xu, “Hydrothermal formation mechanism of lignocellulose-derived carbon dots: From sawdust to carbon nanomaterials with blue fluorescence,” *Bioresour. Technol.*, vol. 429, p. 132493, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132493>.
- [165] V. Bressi, A. M. Balu, D. Iannazzo, and C. Espro, “Recent advances in the synthesis of carbon dots from renewable biomass by high-efficient hydrothermal and microwave green approaches,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 40, p. 100742, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100742>.
- [166] P. Wang, C. Chen, H. Ren, and E. Duan, “A review of carbon dots in synthesis strategies, photoluminescence mechanisms, and applications in wastewater treatment,” *Chinese Chem. Lett.*, p. 110725, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2024.110725>.
- [167] C. Li, X. Zhu, and M. Xu, “A Theoretical Investigation into the Oligomer Structure of Carbon Dots Formed from Small-Molecule Precursors,” *Molecules*, vol. 29, no. 12,

- Jun. 2024, doi: 10.3390/molecules29122920.
- [168] S. Sen and A. Bose, "Carbon dots: A review of innovations, applications, challenges, and future prospects," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 173, p. 113852, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113852>.
- [169] C. Liu *et al.*, "Fluorescent carbon dots based on food wastes: Applications in food safety detection," *Chem. Eng. J.*, vol. 499, p. 156434, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156434>.
- [170] H. Soni, M. Bhattu, P. SD, M. Kaur, M. Verma, and J. Singh, "Recent advances in waste-derived carbon dots and their nanocomposites for environmental remediation and biological applications," *Environ. Res.*, vol. 251, p. 118560, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118560>.
- [171] Z. Lin *et al.*, "A fluorescence 'turn-on' sensor for ascorbic acid in fruit juice and beverage based on ascorbate oxidase-like activity of citric acid-derived carbon dots," *Food Chem.*, vol. 437, p. 137928, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137928>.
- [172] J. Guo *et al.*, "Solvent-Engineered Synthesis of Multicolor Emissive Carbon Dots from Citric Acid and Cyanamide," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 63, no. 20, pp. 9050–9057, May 2024, doi: 10.1021/acs.iecr.4c00136.
- [173] A. Piasek, J. Pulit-Prociak, M. Zielina, and M. Banach, "Fluorescence of D-Glucose-Derived Carbon Dots: Effect of Process Parameters," *J. Fluoresc.*, vol. 34, no. 4, pp. 1693–1705, Jul. 2024, doi: 10.1007/s10895-023-03392-z.
- [174] B. De and N. Karak, "A green and facile approach for the synthesis of water soluble fluorescent carbon dots from banana juice," *RSC Adv.*, vol. 3, no. 22, pp. 8286–8290, 2013, doi: 10.1039/C3RA00088E.
- [175] R. Atchudan, T. N. J. I. Edison, S. Perumal, N. Muthuchamy, and Y. R. Lee, "Hydrophilic nitrogen-doped carbon dots from biowaste using dwarf banana peel for environmental and biological applications," *Fuel*, vol. 275, p. 117821, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117821>.
- [176] E. F. C. Simões, J. M. M. Leitão, and J. C. G. E. da Silva, "Carbon dots prepared from citric acid and urea as fluorescent probes for hypochlorite and peroxynitrite," *Microchim. Acta*, vol. 183, no. 5, pp. 1769–1777, 2016, doi: 10.1007/s00604-016-1807-6.
- [177] Z. Hu, X.-Y. Jiao, and L. Xu, "The N,S co-doped carbon dots with excellent luminescent properties from green tea leaf residue and its sensing of gefitinib," *Microchem. J.*, vol. 154, p. 104588, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104588>.
- [178] D. Uriarte, C. Domini, and M. Garrido, "New carbon dots based on glycerol and urea and its application in the determination of tetracycline in urine samples," *Talanta*, vol. 201, pp. 143–148, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.04.001>.
- [179] P. Devi, A. Thakur, S. K. Bhardwaj, S. Saini, P. Rajput, and P. Kumar, "Metal ion sensing and light activated antimicrobial activity of aloe-vera derived carbon dots," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 29, no. 20, pp. 17254–17261, 2018, doi: 10.1007/s10854-018-9819-0.
- [180] S. A. Kousheh, M. Moradi, H. Tajik, and R. Molaei, "Preparation of antimicrobial/ultraviolet protective bacterial nanocellulose film with carbon dots synthesized from lactic acid bacteria," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 155, pp. 216–225, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.230>.

- [181] M. L. Desai, S. Jha, H. Basu, R. K. Singhal, T.-J. Park, and S. K. Kailasa, "Acid Oxidation of Muskmelon Fruit for the Fabrication of Carbon Dots with Specific Emission Colors for Recognition of Hg²⁺ Ions and Cell Imaging," *ACS Omega*, vol. 4, no. 21, pp. 19332–19340, Nov. 2019, doi: 10.1021/acsomega.9b02730.
- [182] S. Cailotto *et al.*, "Carbon Dots from Sugars and Ascorbic Acid: Role of the Precursors on Morphology, Properties, Toxicity, and Drug Uptake," *ACS Med. Chem. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 832–837, Aug. 2018, doi: 10.1021/acsmchemlett.8b00240.
- [183] K. Ahmad and H. Kim, "Sustainable kiwi fruit derived carbon dots architected WO₃ (KF-CDs@WO₃) thin films based flexible electrochromic devices with improved stability for next generation smart windows applications," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 165, p. 112546, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112546>.
- [184] Y. M. Bakier, M. Ghali, A. Elkun, A. M. Beltagi, and W. K. Zahra, "Static interaction between colloidal carbon nano-dots and aniline: A novel platform for ultrasensitive detection of aniline in aqueous media," *Mater. Res. Bull.*, vol. 134, p. 111119, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.111119>.
- [185] D. M. A. Crista, A. El Mragui, M. Algarra, J. C. G. Esteves da Silva, R. Luque, and L. P. da Silva, "Turning spent coffee grounds into sustainable precursors for the fabrication of carbon dots," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, pp. 1–17, Jun. 2020, doi: 10.3390/nano10061209.
- [186] X. Dong *et al.*, "Fast one-step synthesis of N-doped carbon dots by pyrolyzing ethanolamine," *J. Mater. Chem. C*, vol. 2, no. 36, pp. 7477–7481, 2014, doi: 10.1039/C4TC01139B.
- [187] S. K. Rajkishore *et al.*, "Novel Synthesis of Carbon Dots from Coconut Wastes and Its Potential as Water Disinfectant," *Sustain.*, vol. 15, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151410924.
- [188] M. Zhang *et al.*, "Biodegradable Poly(γ -glutamic acid)@glucose oxidase@carbon dot nanoparticles for simultaneous multimodal imaging and synergetic cancer therapy," *Biomaterials*, vol. 252, p. 120106, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.120106>.
- [189] S. D. Al-Qahtani *et al.*, "Development of fluorescent carbon dots ink from rice straw waste toward security authentication," *J. Mol. Liq.*, vol. 354, p. 118927, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118927>.
- [190] V. K. Jothi, K. Ganesan, A. Natarajan, and A. Rajaram, "Green Synthesis of Self-Passivated Fluorescent Carbon Dots Derived from Rice Bran for Degradation of Methylene Blue and Fluorescent Ink Applications," *J. Fluoresc.*, vol. 31, no. 2, pp. 427–436, 2021, doi: 10.1007/s10895-020-02652-6.
- [191] Q. Cen *et al.*, "Glycine assists in efficient synthesis of herbal carbon dots with enhanced yield and performance," *J. Mater. Chem. B*, vol. 10, no. 34, pp. 6433–6442, 2022, doi: 10.1039/D2TB01334G.
- [192] J. Shen, S. Shang, X. Chen, D. Wang, and Y. Cai, "Facile synthesis of fluorescence carbon dots from sweet potato for Fe³⁺ sensing and cell imaging," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 76, pp. 856–864, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.178>.
- [193] W. Chen, C. Hu, Y. Yang, J. Cui, and Y. Liu, "Rapid synthesis of carbon dots by hydrothermal treatment of lignin," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2016, doi: 10.3390/ma9030184.
- [194] A. Prasannan and T. Imae, "One-Pot Synthesis of Fluorescent Carbon Dots from Orange Waste Peels," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 44, pp. 15673–15678, Nov.

- 2013, doi: 10.1021/ie402421s.
- [195] T. Ghosh *et al.*, “Fabrication of Folic Acid-Derived Carbon Dot-Conjugated Chitosan Nanospheres as Theragnostic Agents for pH-Responsive Anticancer Drug Delivery,” *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 8, no. 4, pp. 3096–3110, Apr. 2025, doi: 10.1021/acsabm.4c01962.
 - [196] J. Ma *et al.*, “Facile green preparation of highly fluorescent nitrogen-doped carbon dots from bagasse for sensitive methyl parathion detection,” *Food Chem.*, vol. 466, p. 142183, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142183>.
 - [197] L. Kumalayanti, T. Mahatnirunkul, Y. Chimupala, S. Pinitsoontorn, and N. Chankhunthod, “Facile microwave-assisted synthesis of carbon quantum dots from sugarcane bagasse decorated anatase-rutile TiO₂ for efficient ciprofloxacin removal,” *J. Water Process Eng.*, vol. 72, p. 107551, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107551>.
 - [198] Y. Wang *et al.*, “High fluorescence quantum yield of methionine-doped carbon quantum dots for achieving rapid assay of tetracyclines in foodstuffs,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 329, p. 125498, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125498>.
 - [199] S. Zhu *et al.*, “Surface chemistry routes to modulate the photoluminescence of graphene quantum dots: From fluorescence mechanism to up-conversion bioimaging applications,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 22, no. 22, pp. 4732–4740, 2012, doi: 10.1002/adfm.201201499.
 - [200] Z. Dong and Q. Zhou, “Carbon-based nanostructured materials incorporating carbon dots for supercapacitors: a review,” *Nanoscale*, vol. 17, no. 16, pp. 9786–9803, 2025, doi: 10.1039/D4NR05096G.
 - [201] Z. Wang, R. Changotra, M. Dasog, G. Singh Selopal, J. Yang, and Q. S. He, “Carbon quantum dots: Synthesis via hydrothermal processing, doping strategies, integration with photocatalysts, and their application in photocatalytic hydrogen production,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 44, p. e01386, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01386>.
 - [202] J. Qi *et al.*, “Metal-doped carbon dots for biomedical applications: From design to implementation,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e32133, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32133>.
 - [203] C. Wang *et al.*, “Preparation of high quantum yield nitrogen-doped carbon quantum dots via solid-phase pyrolysis for highly sensitive ‘on-off-on’ fluorescence probe detection of silver ions and glutathione,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 711, p. 136416, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136416>.
 - [204] Y. Zhang, Y. Wang, X. Feng, F. Zhang, Y. Yang, and X. Liu, “Effect of reaction temperature on structure and fluorescence properties of nitrogen-doped carbon dots,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 387, pp. 1236–1246, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.048>.
 - [205] Z. Yang *et al.*, “Nitrogen-doped, carbon-rich, highly photoluminescent carbon dots from ammonium citrate,” *Nanoscale*, vol. 6, no. 3, pp. 1890–1895, 2014, doi: 10.1039/C3NR05380F.
 - [206] L. Wang and H. S. Zhou, “Green synthesis of luminescent nitrogen-doped carbon dots from milk and its imaging application,” *Anal. Chem.*, vol. 86, no. 18, pp. 8902–8905, 2014, doi: 10.1021/ac502646x.
 - [207] F. Qian, X. Li, L. Tang, S. K. Lai, C. Lu, and S. P. Lau, “Potassium doping: Tuning

- the optical properties of graphene quantum dots,” *AIP Adv.*, vol. 6, no. 7, Jul. 2016, doi: 10.1063/1.4959906.
- [208] Y. Choi *et al.*, “Integrative Approach toward Uncovering the Origin of Photoluminescence in Dual Heteroatom-Doped Carbon Nanodots,” *Chem. Mater.*, vol. 28, no. 19, pp. 6840–6847, Oct. 2016, doi: 10.1021/acs.chemmater.6b01710.
- [209] J. Wang *et al.*, “Copper-Doped Carbon Dots for Optical Bioimaging and Photodynamic Therapy,” *Inorg. Chem.*, vol. 58, no. 19, pp. 13394–13402, Oct. 2019, doi: 10.1021/acs.inorgchem.9b02283.
- [210] Y. Liu *et al.*, “Nitrogen and copper (II) co-doped carbon dots for applications in ascorbic acid determination by non-oxidation reduction strategy and cellular imaging,” *Talanta*, vol. 210, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.talanta.2019.120649.
- [211] F. Du *et al.*, “Engineered gadolinium-doped carbon dots for magnetic resonance imaging-guided radiotherapy of tumors,” *Biomaterials*, vol. 121, pp. 109–120, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.biomaterials.2016.07.008.
- [212] R. Yu, M. Ou, Q. Hou, C. Li, S. Qu, and Z. Tan, “Metal and non-metal doped carbon dots: properties and applications,” *Light Adv. Manuf.*, vol. 5, no. 0, p. 1, 2024, doi: 10.37188/lam.2024.041.
- [213] Y. Xu *et al.*, “Nitrogen-Doped Carbon Dots: A Facile and General Preparation Method, Photoluminescence Investigation, and Imaging Applications,” *Chem. – A Eur. J.*, vol. 19, no. 7, pp. 2276–2283, Feb. 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/chem.201203641>.
- [214] S. Munusamy *et al.*, “Nitrogen-doped carbon dots: Recent developments in its fluorescent sensor applications,” *Environ. Res.*, vol. 231, p. 116046, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116046>.
- [215] Q. Xu *et al.*, “Preparation of highly photoluminescent sulfur-doped carbon dots for Fe(III) detection,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 2, pp. 542–546, 2015, doi: 10.1039/C4TA05483K.
- [216] M. Ghiasi, M. Ghanbarzadeh, A. Ghaffarinejad, and F. Shahdost-Fard, “Green nitrogen and sulfur co-doped carbon dots derived from eggshell as a high performance aptasensing interface for non-invasive detection of metronidazole,” *Talanta*, vol. 285, p. 127363, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127363>.
- [217] S. Yu, S. Lu, D. Tan, and Y. Zhu, “Nitrogen and phosphorus co-doped carbon dots for developing highly flame retardant poly (vinyl alcohol) composite films,” *Eur. Polym. J.*, vol. 164, p. 110970, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110970>.
- [218] R. E. Kannouma, A. H. Kamal, M. A. Hammad, and F. R. Mansour, “Fabrication of Highly Fluorescent Nitrogen and Phosphorus Dual-Doped Carbon Dots for Selective Sensing of Rutin,” *Luminescence*, vol. 40, no. 1, p. e70089, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.70089>.
- [219] W. Li, Y. Han, X. Wang, and H. Zhao, “Double Emissions in Boron-Doped Carbon Dots for Anticounterfeiting Applications,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 7, no. 2, pp. 2304–2311, Jan. 2024, doi: 10.1021/acsanm.3c05760.
- [220] W. Zheng *et al.*, “Copper/calcium co-doped carbon dots for targeted cancer therapy with dual-mode imaging and synergistic induction of cuproptosis and calcium-mediated apoptosis,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 690, p. 137337, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.137337>.
- [221] L. Li *et al.*, “Peroxidase-like copper-doped carbon-dots embedded in hydrogels for stimuli-responsive bacterial biofilm elimination and wound healing,” *Acta Biomater.*,

- vol. 195, pp. 467–478, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.02.022>.
- [222] S. Daniel, M. G. Praveena, and E. M. Mohammed, “Exploration of highly photoluminescent first-row transition metals (manganese, iron, cobalt, nickel, copper and zinc) co-doped nano carbon dots as energy storage materials,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 269, p. 115145, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115145>.
- [223] S. Li *et al.*, “Immunoantitumor Activity and Oxygenation Effect Based on Iron–Copper-Doped Folic Acid Carbon Dots,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, no. 13, pp. 16653–16668, Apr. 2024, doi: [10.1021/acsami.3c18331](https://doi.org/10.1021/acsami.3c18331).
- [224] T. Luo *et al.*, “Iron doped carbon dots based nanohybrids as a tetramodal imaging agent for gene delivery promotion and photothermal-chemodynamic cancer synergistic theranostics,” *Mater. Des.*, vol. 208, p. 109878, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109878>.
- [225] A. A. Efimova *et al.*, “Effect of Gadolinium Doping on the Optical and Magnetic Properties of Red-Emitting Dual-Mode Carbon Dot-Based Probes for Magnetic Resonance Imaging,” *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 1493–1502, Feb. 2025, doi: [10.1021/acsabm.4c01705](https://doi.org/10.1021/acsabm.4c01705).
- [226] G. Shu, T. Jiang, X. Zhang, and H. Zhao, “Gadolinium and Ytterbium-Doped carbon dots for Fluorescence/Magnetic Resonance/Computed tomography multimodal imaging,” *Chem. Eng. J.*, vol. 494, p. 153086, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153086>.
- [227] H. Wang *et al.*, “Targeted reversal of iron deposition by highly active manganese-doped carbon dots in MRI-guided treatment of Parkinson’s disease,” *Carbon N. Y.*, vol. 237, p. 120152, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120152>.
- [228] M. Tariq, S. Shivalkar, H. Hasan, A. K. Sahoo, and M. P. Sk, “Manganese Doping in Biomass Derived Carbon Dots Amplifies White Light-Induced Antibacterial Activity,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 51, pp. 49460–49466, Dec. 2023, doi: [10.1021/acsomega.3c08586](https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08586).
- [229] S. Strickland, L. Fourroux, and D. Pappas, “Effect of precursors on carbon dot functionalization and applications: a review,” *Analyst*, vol. 150, no. 8, pp. 1448–1469, 2025, doi: [10.1039/D4AN01554A](https://doi.org/10.1039/D4AN01554A).
- [230] G. V Carballo *et al.*, “Effect of tertiary amine carbon quantum dots incorporation on oil/water separation performance of membranes,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 2, p. 115784, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115784>.
- [231] M. B. Cánchez *et al.*, “Enhanced selectivity of carbon quantum dots for metal ion detection through surface modification by heteroatom doping: A study on optical properties and theoretical approach,” *Carbon Trends*, vol. 18, p. 100445, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100445>.
- [232] M. Vázquez-González *et al.*, “Mimicking Horseradish Peroxidase Functions Using Cu²⁺-Modified Carbon Nitride Nanoparticles or Cu²⁺-Modified Carbon Dots as Heterogeneous Catalysts,” *ACS Nano*, vol. 11, no. 3, pp. 3247–3253, Mar. 2017, doi: [10.1021/acs.nano.7b00352](https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00352).
- [233] A. B. Bourlinos *et al.*, “Fe(III)-functionalized carbon dots—Highly efficient photoluminescence redox catalyst for hydrogenations of olefins and decomposition of hydrogen peroxide,” *Appl. Mater. Today*, vol. 7, pp. 179–184, Jun. 2017, doi: [10.1016/j.apmt.2017.03.002](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.03.002).
- [234] M. Xu, Z. Gao, Q. Zhou, Y. Lin, M. Lu, and D. Tang, “Terbium ion-coordinated carbon dots for fluorescent aptasensing of adenosine 5'-triphosphate with unmodified

- gold nanoparticles,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 86, pp. 978–984, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.bios.2016.07.105.
- [235] M. Rong *et al.*, “A ratiometric fluorescence visual test paper for an anthrax biomarker based on functionalized manganese-doped carbon dots,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 265, pp. 498–505, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.snb.2018.03.094.
- [236] H. Chen *et al.*, “A ratiometric fluorescent nanoprobe based on terbium functionalized carbon dots for highly sensitive detection of an anthrax biomarker,” *Chem. Commun.*, vol. 51, no. 24, pp. 5036–5039, 2015, doi: 10.1039/c5cc00757g.
- [237] X. Ran, H. Sun, F. Pu, J. Ren, and X. Qu, “Ag Nanoparticle-decorated graphene quantum dots for label-free, rapid and sensitive detection of Ag⁺ and biothiols,” *Chem. Commun.*, vol. 49, no. 11, pp. 1079–1081, 2013, doi: 10.1039/C2CC38403E.
- [238] X. Tian and Z. Fan, “Comparison between terbium-doped carbon dots and terbium-functionalized carbon dots: Characterization, optical properties, and applications in anthrax biomarker detection,” *J. Lumin.*, vol. 244, p. 118732, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118732>.
- [239] B. Unnikrishnan, C.-W. Wu, I.-W. P. Chen, H.-T. Chang, C.-H. Lin, and C.-C. Huang, “Carbon Dot-Mediated Synthesis of Manganese Oxide Decorated Graphene Nanosheets for Supercapacitor Application,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 6, pp. 3008–3016, Jun. 2016, doi: 10.1021/acssuschemeng.5b01700.
- [240] L. Lin *et al.*, “Europium-decorated graphene quantum dots as a fluorescent probe for label-free, rapid and sensitive detection of Cu²⁺ and l-cysteine,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 891, pp. 261–268, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.08.011>.
- [241] Y. Zhao *et al.*, “Aluminum-Based Surface Polymerization on Carbon Dots with Aggregation-Enhanced Luminescence,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 12, no. 19, pp. 4530–4536, May 2021, doi: 10.1021/acs.jpcllett.1c01240.
- [242] M. Pandey *et al.*, “Frontiers in polymer/carbon dots nanocomposites: Recent advances in synthesis and diverse applications,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 60, p. 106101, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106101>.
- [243] M. Pourmadadi *et al.*, “Novel carbon quantum dots incorporated polyacrylic acid/polyethylene glycol pH-sensitive nanoplatfrom for drug delivery,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 159, p. 111814, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111814>.
- [244] K.-V. Le *et al.*, “Biogenic fluorescent carbon dot-decorated mesoporous organosilica nanoparticles for enhanced bioimaging and chemotherapy,” *Nanoscale Horizons*, vol. 10, no. 5, pp. 1000–1006, 2025, doi: 10.1039/D4NH00633J.
- [245] Y. P. Sun *et al.*, “Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 128, no. 24, pp. 7756–7757, 2006, doi: 10.1021/ja062677d.
- [246] J. Zhu *et al.*, “Modulation of the photoluminescence in carbon dots through surface modification: From mechanism to white light-emitting diodes,” *Nanotechnology*, vol. 29, no. 24, Apr. 2018, doi: 10.1088/1361-6528/aab9d6.
- [247] S. Hu, Y. Zhou, C. Xue, J. Yang, and Q. Chang, “A solid reaction towards: In situ hybridization of carbon dots and conjugated polymers for enhanced light absorption and conversion,” *Chem. Commun.*, vol. 53, no. 68, pp. 9426–9429, 2017, doi: 10.1039/c7cc05526a.
- [248] P. Varvarà, N. Mauro, and G. Cavallaro, “Targeted NIR-triggered doxorubicin release using carbon dots–poly(ethylene glycol)–folate conjugates for breast cancer

- treatment,” *Nanoscale Adv.*, vol. 7, no. 3, pp. 862–875, 2025, doi: 10.1039/D4NA00834K.
- [249] M. Salman, M. Aslam, Z. Mustafa, M. Ahmad, and A. Shehzad, “Flexible polypyrrole/polyvinyl alcohol/titanium dioxide/graphene quantum dots nanocomposite films for energy storage devices,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 152, p. 111996, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.111996>.
- [250] J. Gu, T. Han, X. Peng, H. Kang, and L. Dong, “Highly sensitive fluorescent probe and portable test strip based on polyacrylic acid functionalized quantum dots for rapid visual detection of malachite green,” *Talanta*, vol. 268, p. 125359, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125359>.
- [251] C. Dhanush, M. Ismayati, and M. G. Sethuraman, “Targeted bio-imaging in discriminating normal and cancerous cells using dual-doped carbon dots derived from *Dahlia pinnata* flower extract,” *Microchim. Acta*, vol. 192, no. 4, p. 254, 2025, doi: 10.1007/s00604-025-07100-5.
- [252] J. Zhu *et al.*, “Carbon dots with efficient solid-state red-light emission through the step-by-step surface modification towards light-emitting diodes,” *Dalt. Trans.*, vol. 47, no. 11, pp. 3811–3818, 2018, doi: 10.1039/c7dt04579d.
- [253] Q. Liu *et al.*, “Distinguish cancer cells based on targeting turn-on fluorescence imaging by folate functionalized green emitting carbon dots,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 64, pp. 119–125, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.bios.2014.08.052.
- [254] W. Dong, S. Zhou, Y. Dong, J. Wang, X. Ge, and L. Sui, “The preparation of ethylenediamine-modified fluorescent carbon dots and their use in imaging of cells,” *Luminescence*, vol. 30, no. 6, pp. 867–871, Sep. 2015, doi: 10.1002/bio.2834.
- [255] S. K. Bhattacharyya *et al.*, “Synthesis of 1, 2, 3-triazole linked 5 fluorouracil - carbon dots -folate conjugates for target specific anticancer activity and cell imaging applications,” *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 38, p. 101160, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101160>.
- [256] X. Zhao, J. Zhang, L. Shi, M. Xian, C. Dong, and S. Shuang, “Folic acid-conjugated carbon dots as green fluorescent probes based on cellular targeting imaging for recognizing cancer cells,” *RSC Adv.*, vol. 7, no. 67, pp. 42159–42167, 2017, doi: 10.1039/C7RA07002K.
- [257] J. Soleymani, S. Azizi, S. Abbaspour-Ravasjani, M. Hasanzadeh, M. Hossein Somi, and A. Jouyban, “Glycoprotein-based bioimaging of HeLa cancer cells by folate receptor and folate decorated graphene quantum dots,” *Microchem. J.*, vol. 170, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.microc.2021.106732.
- [258] H. Saljoughi, F. Khakbaz, and M. Mahani, “Synthesis of folic acid conjugated photoluminescent carbon quantum dots with ultrahigh quantum yield for targeted cancer cell fluorescence imaging,” *Photodiagnosis Photodyn. Ther.*, vol. 30, p. 101687, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101687>.
- [259] F. Wang, Z. Xie, H. Zhang, C. Liu, and Y. Zhang, “Highly Luminescent Organosilane-Functionalized Carbon Dots,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 1027–1031, Mar. 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201002279>.
- [260] C. Yang, R. Wenqing, Q. Junchao, C. Feng, and F. and Cao, “Study on the properties of biomass carbon quantum dots modified with diamine compounds and their application in iron ion detection,” *Fullerenes, Nanotub. Carbon Nanostructures*, vol. 33, no. 7, pp. 740–753, Jul. 2025, doi: 10.1080/1536383X.2025.2450299.
- [261] M. Serhan *et al.*, “Bio-nanoplatfroms based on carbon dots conjugating with F-

- substituted nano-hydroxyapatite for cellular imaging,” in *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, 2019, vol. 2019-November. doi: 10.1039/x0xx00000x.
- [262] J. Yuan, J. Zhang, R. Liang, H. Shen, Z. Suo, and H. Jin, “H-branching DNA nanostructures combined with dual-emitting carbon quantum dots for simultaneous detection of Pb²⁺ and Cd²⁺,” *Microchem. J.*, vol. 209, p. 112635, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112635>.
- [263] G. Cui *et al.*, “Protein coronas formed by three blood proteins and food-borne carbon dots from roast mackerel: Effects on cytotoxicity and cellular metabolites,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 216, pp. 799–809, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.196>.
- [264] P. Xiao *et al.*, “Photoluminescence immunoassay based on grapefruit peel-extracted carbon quantum dots encapsulated into silica nanospheres for p53 protein,” *Biochem. Eng. J.*, vol. 139, pp. 109–116, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.08.012>.
- [265] X. Song, L. Cao, S. Cong, Y. Song, and M. Tan, “Characterization of Endogenous Nanoparticles from Roasted Chicken Breasts,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 66, no. 28, pp. 7522–7530, Jul. 2018, doi: 10.1021/acs.jafc.8b01988.
- [266] X. Song, Y. Song, Z. Guo, and M. Tan, “Influence of protein coronas between carbon nanoparticles extracted from roasted chicken and pepsin on the digestion of soy protein isolate,” *Food Chem.*, vol. 385, p. 132714, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132714>.
- [267] L. Cao, J. Li, Y. Song, S. Cong, H. Wang, and M. Tan, “Molecular interaction of fluorescent carbon dots from mature vinegar with human hemoglobin: Insights from spectroscopy, thermodynamics and AFM,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 167, pp. 415–422, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.203>.
- [268] Y. Song, H. Wang, L. Zhang, B. Lai, K. Liu, and M. Tan, “Protein corona formation of human serum albumin with carbon quantum dots from roast salmon,” *Food Funct.*, vol. 11, no. 3, pp. 2358–2367, 2020, doi: 10.1039/C9FO02967B.
- [269] L. Cao *et al.*, “Fluorescent nanoparticles from mature vinegar: their properties and interaction with dopamine,” *Food Funct.*, vol. 8, no. 12, pp. 4744–4751, 2017, doi: 10.1039/C7FO01475A.
- [270] S. Krishna Saraswat *et al.*, “Carbon quantum dots: A comprehensive review of green Synthesis, characterization and investigation their applications in bioimaging,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 162, p. 112279, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112279>.
- [271] T. P. M. Daby, U. Modi, A. K. Yadav, D. Bhatia, and R. Solanki, “Bioimaging and therapeutic applications of multifunctional carbon quantum dots: Recent progress and challenges,” *Next Nanotechnol.*, vol. 8, p. 100158, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100158>.
- [272] P. Dubey, “An overview on animal/human biomass-derived carbon dots for optical sensing and bioimaging applications,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 50, pp. 35088–35126, 2023, doi: <https://doi.org/10.1039/d3ra06976a>.
- [273] M. Zhang, X. Zhai, T. Ma, Y. Huang, C. Yan, and Y. Du, “Multifunctional cerium doped carbon dots nanoplatfrom and its applications for wound healing,” *Chem. Eng. J.*, vol. 423, p. 130301, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130301>.
- [274] Z. A. Qureshi, H. Dabash, D. Ponnammam, and M. K. G. Abbas, “Carbon dots as versatile nanomaterials in sensing and imaging: Efficiency and beyond,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e31634, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31634>.

- [275] G. A. Nasser Atia *et al.*, “Carbon Dots as Promising Carbon Nanomaterials for Diagnostics, Therapeutics, and Regenerative Orofacial Applications,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, p. 106808, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2025.106808>.
- [276] M. Weiss *et al.*, “Density of surface charge is a more predictive factor of the toxicity of cationic carbon nanoparticles than zeta potential,” *J. Nanobiotechnology*, vol. 19, no. 1, p. 5, 2021, doi: [10.1186/s12951-020-00747-7](https://doi.org/10.1186/s12951-020-00747-7).
- [277] Y. He, S. Liu, F. Xie, Y. Zhou, and X. Yang, “Application of green tea residue-derived carbon dots in the detection of Fe³⁺ ions and imaging of Caco-2 cells,” *J. Food Compos. Anal.*, vol. 132, p. 106332, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106332>.
- [278] Z. Ruan *et al.*, “Multifunctional nitrogen-sulfur codoped carbon quantum dots: Determining reduced glutathione, broad-spectrum antibacterial activity, and cell imaging,” *Heliyon*, vol. 10, no. 19, p. e38177, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38177>.
- [279] H. S. Al-mashriqi *et al.*, “B, S, N co-doped carbon dots-based highly sensitive and rapid nanoprobe for monitoring of pepsin activity in human saliva and its cell imaging,” *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 465, p. 116349, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2025.116349>.
- [280] B. Devi, K. Mandal, A. P. Singh, and C. Dalal, “Microwave-assisted sustainable synthesis of yellow emissive carbon dots for selective sensing of Hg (II) ions and cancer cell imaging,” *J. Mol. Struct.*, vol. 1335, p. 141966, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.141966>.
- [281] T. Zhao *et al.*, “Red emitting carbon dots for detection of endogenous glutathione with fluorescence enhancement and cell imaging,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 333, p. 125901, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125901>.
- [282] Z.-Y. FAN, Z.-J. LIU, R.-L. ZHANG, G.-M. HAN, and Z.-P. ZHANG, “Preparation of Lysosome-targeting Carbon Dots and Its Application in Cell Imaging,” *Chinese J. Anal. Chem.*, vol. 49, no. 7, pp. 1208–1217, 2021, doi: [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(21\)60108-1](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(21)60108-1).
- [283] R. Tian *et al.*, “Green synthesis of multifunctional carbon dots from Crataegi Fructus for pH sensing, cell imaging and hemostatic effects,” *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 438, p. 114531, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114531>.
- [284] M. Zong *et al.*, “Synthesis of multicolor luminescent carbon dots based on carboxymethyl chitosan for cell imaging and wound healing application: In vitro and in vivo studies,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 253, p. 127405, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127405>.
- [285] M. Thakur *et al.*, “Milk-derived multi-fluorescent graphene quantum dot-based cancer theranostic system,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 67, pp. 468–477, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.05.007>.
- [286] Y. Xing *et al.*, “Synthesis of magnetic carbon dot drug complex for targeting to nucleus in liver cancer therapy and fluorescence/magnetic resonance dual-modal imaging,” *Microchem. J.*, vol. 213, p. 113719, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113719>.
- [287] P. Venkatesan *et al.*, “Eco-friendly, bright luminescent carbon dots and their potential applications for detecting hypochlorous acid in water and live cell imaging,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 6522–6532, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.007>.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.181>.

- [288] Z. Guo *et al.*, “Copper doped carbon dots for selective determination of regulated aniline additives and safe hair dyeing,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 1357, p. 344071, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.344071>.
- [289] Y. Liu *et al.*, “Dual functions of nitrogen and phosphorus co-doped carbon dots for drug-targeted delivery and two-photon cell imaging,” *Arab. J. Chem.*, vol. 16, no. 5, p. 104671, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104671>.
- [290] T. Paul, J. J. Palakulam, N. V. Unnikrishnan, R. Philip, and K. A. A. Mary, “Warm to cool tunable ultra-stable white light emissions from carbon dots -Tb³⁺ - Eu³⁺ doped silica,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 138, Apr. 2023, doi: [10.1016/j.optmat.2023.113673](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113673).
- [291] Y. Hou *et al.*, “Mg²⁺-doped carbon dots synthesized based on Lycium ruthenicum in cell imaging and promoting osteogenic differentiation in vitro,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 656, p. 130264, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130264>.
- [292] J. Du *et al.*, “Curcumin-derived water-soluble carbon dots without detectable resistance: Dual potentials for antimicrobial activity and infected wound healing,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 153, p. 112075, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112075>.
- [293] K. O. Boakye-Yiadom *et al.*, “Carbon dots: Applications in bioimaging and theranostics,” *Int. J. Pharm.*, vol. 564, pp. 308–317, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.04.055>.
- [294] R. Rajamanikandan, D. S. Prabakaran, K. Sasikumar, J. S. Seok, G. Lee, and H. Ju, “Biocompatible bright orange emissive carbon dots: Multifunctional nanoprobes for highly specific sensing toxic Cr(VI) ions and mitochondrial targeting cancer cell imaging,” *Talanta Open*, vol. 10, p. 100353, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100353>.
- [295] P. Phukan, M. Hatimuria, S. Bag, A. Pabbathi, and J. Das, “Advances in Red/Near infrared carbon dots in bioimaging, sensing, and phototherapeutic applications,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 163, p. 112389, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112389>.
- [296] M. Bartkowski, Y. Zhou, M. Nabil Amin Mustafa, A. J. Eustace, and S. Giordani, “CARBON DOTS: Bioimaging and Anticancer Drug Delivery,” *Chem. – A Eur. J.*, vol. 30, no. 19, p. e202303982, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/chem.202303982>.
- [297] T. Ghosh *et al.*, “Nitrogen and sulphur doped carbon dot: An excellent biocompatible candidate for in-vitro cancer cell imaging and beyond,” *Environ. Res.*, vol. 217, p. 114922, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114922>.
- [298] H. S. Al-mashriqi *et al.*, “Multifunctional Eu-doped carbon dots nanoprobes for highly sensitive and selective determination of glutathione in biological fluid and cell imaging,” *Carbon N. Y.*, vol. 228, p. 119380, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119380>.
- [299] J. Yang *et al.*, “Folic acid conjugated carbon dots doped metal-organic framework materials for cell imaging,” *Mater. Today Chem.*, vol. 26, p. 101202, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101202>.
- [300] R. Tamizhselvi *et al.*, “Heteroatom-Doped carbon dots as ‘On-Off-On’ fluorescent sensors for Fe³⁺ and L-cysteine detection with applications in real samples and Colon cancer cell imaging,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 172, p. 113662, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.113662>.

<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113662>.

- [301] Y. Han, M. Kou, H. Zhang, H. Qiu, and Y.-P. Shi, "Chiral fluorescent carbon dots for tyrosine enantiomers: Discrimination, mechanism and cell imaging," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 422, p. 136677, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136677>.
- [302] L.-F. Pang, W.-L. Fang, B. Zhang, and Q.-J. Xu, "Synthesis of non-modified near-infrared carbon dots for hypochlorite detection and cell membrane imaging," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 321, p. 124743, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124743>.
- [303] Y. Chen *et al.*, "One-pot hydrothermal synthesis of silicon, nitrogen co-doped carbon dots for enhancing enzyme activity of acid phosphatase (ACP) to dopamine and for cell imaging," *Talanta*, vol. 278, p. 126451, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126451>.
- [304] X. Kou, Y. Cong, W.-F. Dong, and L. Li, "Rare earth-modified yellow carbon dots for long-term imaging in cells and zebrafish," *Mater. Des.*, vol. 240, p. 112855, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112855>.
- [305] C. Lai, S. Lin, L. Xiong, Y. Wu, C. Liu, and Y. Jin, "High quantum yield nitrogen-doped carbon quantum dots: Green synthesis and application as 'on-off' fluorescent sensors for specific Fe³⁺ ions detection and cell imaging," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 133, p. 109702, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109702>.
- [306] S. Nangan *et al.*, "Sustainable preparation of luminescent carbon dots from syringe waste and hyaluronic acid for cellular imaging and antimicrobial applications," *Environ. Res.*, vol. 237, p. 116990, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116990>.
- [307] X. Zhang *et al.*, "Non-cytotoxic lanthanum and nitrogen co-doped lignin-based carbon dots for selective detection of ions in biological imaging," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 109881, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109881>.
- [308] J. Tao *et al.*, "Fabrication of FA/HA-functionalized carbon dots for human breast cancer cell targeted imaging," *Photodiagnosis Photodyn. Ther.*, vol. 40, p. 103099, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2022.103099>.
- [309] M. A. Camacho-González, M. Quezada-Cruz, G. I. Cerón-Montes, M. F. Ramírez-Ayala, L. E. Hernández-Cruz, and A. Garrido-Hernández, "Synthesis and characterization of magnetic zinc-copper ferrites: Antibacterial activity, photodegradation study and heavy metals removal evaluation," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 236, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.matchemphys.2019.121808](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121808).
- [310] X. Long and S. Wu, "Exploring the next super fluorescent carbon Dots: Hydrothermal synthesis of Dual-Function ultra-bright blue fluorescent carbon dots with a quantum yield of 75.4%," *Microchem. J.*, vol. 207, p. 112035, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112035>.
- [311] F. C. Sánchez-Vargas, S. I. Garduño, and V. Rodríguez-Lugo, "Impact of short reaction times on the structural control of hydrothermally synthesized rod-shaped ZnO arrays," *MRS Adv.*, 2025, doi: [10.1557/s43580-025-01183-1](https://doi.org/10.1557/s43580-025-01183-1).
- [312] Q. Zhang *et al.*, "Efficient synthesis of red-emissive nitrogen-doped carbon dots for sensitive detection of amaranth in food samples," *J. Food Compos. Anal.*, vol. 139, p. 107113, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.107113>.
- [313] H. J. Yoo, B. E. Kwak, and D. H. Kim, "Competition of the roles of π -conjugated domain between emission center and quenching origin in the photoluminescence of

- carbon dots depending on the interparticle separation,” *Carbon N. Y.*, vol. 183, pp. 560–570, 2021, doi: 10.1016/j.carbon.2021.07.054.
- [314] Y. Qiu, F. Wang, X. Ma, F. Yin, D. Li, and J. Li, “Carbon quantum dots derived from cassava stems via acid/alkali-assisted hydrothermal carbonization: formation, mechanism and application in drug release,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 204, p. 117243, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117243>.
- [315] D. Han *et al.*, “Eco-friendly Hybrids of Carbon Quantum Dots Modified MoS₂ for Rapid Microbial Inactivation by Strengthened Photocatalysis,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 534–542, Jan. 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b06045.
- [316] L. Zhu, H. Wu, H. Yang, D. Shen, H. Hu, and M. Dou, “Formation mechanism of lignin-derived carbon quantum dots: From chemical structures to fluorescent behaviors,” *Bioresour. Technol.*, vol. 413, p. 131490, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131490>.
- [317] J. Gan *et al.*, “Lignocellulosic Biomass-Based Carbon Dots: Synthesis Processes, Properties, and Applications,” *Small*, vol. 2304066, pp. 1–34, 2023, doi: 10.1002/smll.202304066.
- [318] Y. Liu *et al.*, “Green synthesis of fluorescent carbon dots from carrot juice for in vitro cellular imaging,” *Carbon Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 61–67, 2017, doi: 10.5714/CL.2017.21.061.
- [319] W. Du *et al.*, “Green synthesis of fluorescent carbon quantum dots and carbon spheres from pericarp,” *Sci. China Chem.*, vol. 58, no. 5, pp. 863–870, 2015, doi: 10.1007/s11426-014-5256-y.
- [320] E. R. F. R. Ribeiro *et al.*, “Chitosan-graphene quantum dot based active film as smart wound dressing,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 80, p. 104093, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.104093>.
- [321] L. Li and T. Dong, “Photoluminescence tuning in carbon dots: Surface passivation or/and functionalization, heteroatom doping,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 6, no. 30, pp. 7944–7970, 2018, doi: 10.1039/c7tc05878k.
- [322] N. Eswaramoorthy *et al.*, “Eco-friendly carbon quantum dots from coffee waste: Improving charge transfer in solid-state perovskite solar cells,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 156, p. 112386, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112386>.
- [323] S. J. Mohammed, K. M. Omer, and F. E. Hawaiz, “Deep insights to explain the mechanism of carbon dot formation at various reaction times using the hydrothermal technique: FT-IR, ¹³C-NMR, ¹H-NMR, and UV-visible spectroscopic approaches,” *RSC Adv.*, vol. 13, no. 21, pp. 14340–14349, 2023, doi: 10.1039/D3RA01646C.
- [324] P. M. Olmos-Moya *et al.*, “A novel MnFe₂O₄@CDs material of dual behavior: photothermal conversion performance and fluorescent probe. Capture, detection, and degradation of Atrazine,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 3, p. 116226, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116226>.
- [325] Q. Li, J. Wang, Z. Zhang, Y. Xu, and Y. Fu, “Synthesis of fluorescein modified carbon quantum dots and application of dual emission ratio fluorescent probes for highly selective detection of chlorothalonil,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 339, p. 126278, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126278>.
- [326] X. Cheng *et al.*, “Nano-engineered carbon dots from banana blossoms inhibit advanced glycation end products formation in bakery foods: A mechanistic study through multi-stage kinetic modeling,” *LWT*, vol. 222, p. 117619, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117619>.

- [327] L. Zhou *et al.*, “White light emitting diodes with a high colour rendering index of 98.3 using blue emissive carbon dots,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 11, no. 45, pp. 15926–15933, 2023, doi: 10.1039/D3TC02297H.
- [328] W. Liu *et al.*, “Carbon dots: Surface engineering and applications,” *J. Mater. Chem. B*, vol. 4, no. 35, pp. 5772–5788, 2016, doi: 10.1039/c6tb00976j.
- [329] I. W. Hamley, “PEG – Peptide Conjugates,” 2014.
- [330] M. Park *et al.*, “Controllable Singlet–Triplet Energy Splitting of Graphene Quantum Dots through Oxidation: From Phosphorescence to TADF,” *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 31, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1002/adma.202000936.
- [331] D. Benner, P. Yadav, and D. Bhatia, “Red emitting carbon dots: surface modifications and bioapplications,” *Nanoscale Adv.*, pp. 4337–4353, 2023, doi: 10.1039/d3na00469d.
- [332] K. J. Mintz *et al.*, “A deep investigation into the structure of carbon dots,” *Carbon N. Y.*, vol. 173, pp. 433–447, 2021, doi: 10.1016/j.carbon.2020.11.017.
- [333] Y. Kang *et al.*, “Multicolor carbon dots assembled polyvinyl alcohol with enhanced emission for white light-emitting diode,” *J. Lumin.*, vol. 251, no. June, p. 119164, 2022, doi: 10.1016/j.jlumin.2022.119164.
- [334] S. Bhattacharyya *et al.*, “Effect of nitrogen atom positioning on the trade-off between emissive and photocatalytic properties of carbon dots,” *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1038/s41467-017-01463-x.
- [335] F. Feghhi, A. Minagar, and H. R. Madaah Hosseini, “Bandgap tailoring and enhancing the aromatization in cysteine-based carbon dots,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 651, no. March, pp. 36–46, 2023, doi: 10.1016/j.jcis.2023.07.157.
- [336] H. Li *et al.*, “Tunable light emission from carbon dots by controlling surface defects,” *Chinese Chem. Lett.*, vol. 32, no. 9, pp. 2887–2892, 2021, doi: 10.1016/j.cclet.2021.03.051.
- [337] W. Zhao, C. Song, and P. E. Pehrsson, “Water-soluble and optically pH-sensitive single-walled carbon nanotubes from surface modification,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 124, no. 42, pp. 12418–12419, Oct. 2002, doi: 10.1021/ja027861n.
- [338] S. O. Alzahrani *et al.*, “Electrospun nanofibers membrane of carbon quantum dots loaded onto chitosan-polyvinyl alcohol for removal of rhodamine B dye from aqueous solutions: Adsorption isotherm, kinetics, thermodynamics and optimization via Box-Behnken design,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 304, p. 140951, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140951>.
- [339] M. Rinaudo, “Chitin and chitosan: Properties and applications,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 31, no. 7, pp. 603–632, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>.
- [340] H. Liu *et al.*, “Incorporation of polysaccharides into sodium caseinate-low melting point fat microparticles improves probiotic bacterial survival during simulated gastrointestinal digestion and storage,” *Food Hydrocoll.*, vol. 54, pp. 328–337, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.016>.
- [341] O. Farokhnasab, A. Moghadam, Z. Eslamifar, and A. H. Moghadam, “Fabrication and characterization of chitosan-based bionanocomposite coating reinforced with TiO₂ nanoparticles and carbon quantum dots for enhanced antimicrobial efficacy,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 296, p. 139648, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139648>.
- [342] P. K. Yadav, S. Chandra, V. Kumar, D. Kumar, and S. H. Hasan, “Carbon Quantum

- Dots: Synthesis, Structure, Properties, and Catalytic Applications for Organic Synthesis,” *Catalysts*, vol. 13, no. 422, pp. 1–22, 2023.
- [343] Z. Zhou *et al.*, “Narrowing and blue-shifting photoluminescence of carbon dots by enhancing sp³-C hybridization using a microreactor††Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d4cc05583g>,” *Chem. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 701–704, 2024, doi: <https://doi.org/10.1039/d4cc05583g>.
- [344] P. Negi, N. C. Joshi, S. Upadhyay, and B. S. Rawat, “Solvatochromic study and electrochemical performance of green synthesized rGO decorated metal oxide CQDs from *Dillenia indica* peel extract in nonionic surfactant polymer matrix,” *Next Nanotechnol.*, vol. 8, p. 100205, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100205>.
- [345] F. Zhao *et al.*, “Preparation of photocatalysts decorated by carbon quantum dots (CQDs) and their applications: A review,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, no. 2, p. 109487, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109487>.
- [346] S. M. Mousavi *et al.*, “Innovative development and nondestructive evaluation of CQD-doped ZIF metal-organic frameworks for advanced battery electrocatalysts,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 222, p. 116016, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116016>.
- [347] S. Naghash-Hamed, N. Arsalani, and E. Sharifi As, “The efficacy of carbon quantum dots decorated magnetic metal ferrite nanocomposites in reducing of 4-nitrophenol,” *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 35, p. 101002, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2023.101002>.
- [348] R. M. Mhammedsharif, P. J. Jalil, N. Piro, A. Salih Mohammed, and P. K. Aspoukeh, “Myco-generated and analysis of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using *Aspergillus elegans* extract: A comparative evaluation with a traditional chemical approach,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e31352, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31352>.
- [349] M. Rajkumar *et al.*, “Magnetic nanoparticles of Fe₃O₄ biosynthesis using *Anacardium occidentale* fruit extract: Evaluation of in vitro antioxidant, antibacterial, antidiabetic, anti-cholinesterase and cytotoxic activities,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 175, p. 114107, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114107>.
- [350] Q. Xia, Z. Yao, D. Zhang, D. Li, Z. Zhang, and Z. Jiang, “Rational synthesis of micronano dendritic ZVI@Fe₃O₄ modified with carbon quantum dots and oxygen vacancies for accelerating Fenton-like oxidation,” *Sci. Total Environ.*, vol. 671, pp. 1056–1065, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.435>.
- [351] A. El Nemr, M. A. Hassaan, M. R. Elkatory, S. Ragab, and A. Pantaleo, “Efficiency of fe₃o₄ nanoparticles with different pretreatments for enhancing biogas yield of macroalgae *ulva intestinalis linnaeus*,” *Molecules*, vol. 26, no. 16, 2021, doi: [10.3390/molecules26165105](https://doi.org/10.3390/molecules26165105).
- [352] H. Yin *et al.*, “Heteroatom-doped, vinegar residue-derived fluorine/chlorine Co-doped vertical graphene-supported carbon quantum dots as high-efficiency all-carbon electrodes for water electrolysis hydrogen production,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 5, p. 117654, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117654>.
- [353] A. Priyadarshini and A. A. Napoleon, “Metal and heteroatoms co-doped fluorescent carbon dots for highly selective and sensitive detection of Mg²⁺ ions in aqueous media: Applications in test strips, pharmaceutical, real samples and bioimaging,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 332, p. 125851, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125851>.

- <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125851>.
- [354] H. Chai *et al.*, “Enhancing tetracycline degradation with biomass carbon quantum dot (CQDs)-modified magnetic heterojunction CeO₂-Fe₃O₄ under visible light,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, no. 2, p. 112338, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112338>.
 - [355] Y. Gu *et al.*, “Characterization of carbon quantum dots doped with various heteroatoms and their influence on inhibiting the browning of fresh-cut potatoes,” *Food Packag. Shelf Life*, vol. 47, p. 101440, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101440>.
 - [356] P. Chen *et al.*, “Peroxymonosulfate (PMS) activated by magnetic Fe₃O₄ doped carbon quantum dots (CQDs) for degradation of Rhodamine B (RhB) under visible light: DFT calculations and mechanism analysis,” *J. Clean. Prod.*, vol. 426, p. 139202, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139202>.
 - [357] Z. Zhang *et al.*, “Electrochemically driven inactivation of harmful cyanobacteria assisted with the visible light photocatalyst of CeO₂-Fe₃O₄-CQDs,” *J. Environ. Manage.*, vol. 376, p. 124423, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124423>.
 - [358] S. D. M. Perumal, D. T. Thangaian, M. Nandhakumar, N. Devaraj, and N. K. Kalagatur, “Evolution of large stokes shift and non-radiative energy transfer phenomenon in sustainable blue-fluorescent CQDs upon subnanomolar detection of Acebrophylline,” *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 329, p. 125559, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125559>.
 - [359] A. Başoğlu, Ü. Ocak, and A. Gümrükçüoğlu, “Synthesis of Microwave-Assisted Fluorescence Carbon Quantum Dots Using Roasted–Chickpeas and its Applications for Sensitive and Selective Detection of Fe³⁺ Ions,” *J. Fluoresc.*, vol. 30, no. 3, pp. 515–526, 2020, doi: 10.1007/s10895-019-02428-7.
 - [360] J. Goswami, H. Barman, P. Hazarika, P. Manna, A. Devi, and L. Saikia, “Biomass-derived phosphorous-doped carbon quantum dots (P-CQD): An excellent biocompatible material for in-vitro cell imaging,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 162, p. 112276, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112276>.
 - [361] S. Chandra *et al.*, “Luminescent S-doped carbon dots: an emergent architecture for multimodal applications,” *J. Mater. Chem. B*, vol. 1, no. 18, pp. 2375–2382, 2013, doi: 10.1039/C3TB00583F.



Productos

“Ayudar a otro es un privilegio. Agradece la oportunidad de poder hacerlo”

-Chamalú

Artículos



DESDE 2013
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive>
Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI



ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Padi Vol. 11 No. Especial 5 (2023) 35-43

Síntesis hidrotermal de puntos cuánticos de carbono PEGilados

Hydrothermal synthesis of PEGylated carbon quantum dots

C.A. Zamora-Valencia¹, M.I. Reyes-Valderrama¹, D. Salado-Leza^{1,a,c}, V. Rodríguez-Lugo^{1,b,*}

^aÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184.

^bInvestigadoras e Investigadores por México, CONAHCyT, Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, 03940 Ciudad de México, México.

^cInstituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Parque Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, 78295 San Luis Potosí, S.L.P., México.



Article

Effect of Concentration and pH on the Photoluminescent Properties of CQDs Obtained from *Actinidia deliciosa*

Carlos Alfredo Zamora-Valencia¹, María Isabel Reyes-Valderrama¹, Luis Escobar-Alarcón², Vicente Garibay-Febles³ and Ventura Rodríguez-Lugo^{1,*}

¹ Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Pachuca de Soto, Hidalgo 42184, Mexico; charlyzam010@gmail.com (C.A.Z.-V.); profe_5490@uaeh.edu.mx (M.I.R.-V.)

² Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carr. México-Toluca s/n La Marquesa, Ocoyoacac, Edo. de México, Toluca 52750, Mexico; luis.escobar@inin.gob.mx

³ Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas 152, San Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero, Mexico City 07730, Mexico; vgaribay@imp.mx

* Correspondence: ventura.rl65@gmail.com



Comparison of the optical properties of quantum dots synthesized by the hydrothermal method from fruit sources

Carlos Alfredo Zamora-Valencia , Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Mineral de la Reforma Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184 Hidalgo, México; División de Proceso Industriales, Academia de Nanotecnología, Universidad Tecnológica de Tecámac, Carretera Federal México -Pachuca Km 37.5, Col. Sierra Hermosa, 55740 San Martín Azcatepec, Tecámac, Estado de México, México
Daniela Edith Salado-Leza , Investigadoras e Investigadores por México, CONACYT, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78210 San Luis Potosí, S.L.P., México

Josué Esaú Muñoz-Pérez , Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Mineral de la Reforma Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184 Hidalgo, México

Demetrio Mendoza-Anaya , Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carr. México-Toluca s/n La Marquesa, Ocoyoacac, 52750 Toluca, Edo. de México, México

Vicente Garibay-Febles , Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas 152, San Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero, 07730 Ciudad de México, CDMX, México

Ventura Rodríguez-Lugo , Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Mineral de la Reforma Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184 Hidalgo, México

Address all correspondence to Ventura Rodríguez-Lugo at ventura.rl65@gmail.com

(Received 11 July 2025; accepted 16 September 2025)

Participación en congresos

Simposio “de Investigación en Ciencias de los Materiales “



La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
a través de la Sociedad Mexicana de Materiales otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a
C.A. Zamora-Valencia

Por su participación en el concurso de carteles científicos presentando el trabajo “Efecto del control de superficie de puntos cuánticos de carbono en la intensidad de luminiscencia,” en el marco de actividades del VI Simposio de Investigación en Ciencias de los Materiales y comparte autoría con “M. I. Reyes-Valderrama, V. Rodríguez-Lugo”, efectuado de manera virtual, organizado por el Capítulo Estudiantil de Materiales durante los días 17 y 18 de junio de 2021



Mineral de la Reforma, Hidalgo., a 29 de junio de 2021.

Atentamente:

“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”

MTRO. MIGUEL ARTEAGA VARELA
Presidente del Capítulo Estudiantil de Materiales UAeH-SMM

DR. MARIUS RAMIREZ CARDONA
Jefe del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

DRA. PATRICIA DEL CARMEN ZAMBRANO ROBLEDO
Presidenta de la Sociedad Mexicana de Materiales



ICBI Número de control: ICBI-AAC75M/232/2021



La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
a través de la Sociedad Mexicana de Materiales otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a
C.A. Zamora-Valencia

Por su participación en el concurso de carteles científicos presentando el trabajo “Evaluación de las propiedades ópticas y estabilidad de puntos cuánticos de carbono por el método hidrotérmico cambiando la concentración y pH,” en el marco de actividades del VI Simposio de Investigación en Ciencias de los Materiales y comparte autoría con “M. I. Reyes-Valderrama, L. Escobar-Alarcón, V. Garibay Febles, E. Salinas-Rodríguez, V. Rodríguez-Lugo”, efectuado de manera virtual, organizado por el Capítulo Estudiantil de Materiales durante los días 17 y 18 de junio de 2021



Mineral de la Reforma, Hidalgo., a 29 de junio de 2021.

Atentamente:

“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”

MTRO. MIGUEL ARTEAGA VARELA
Presidente del Capítulo Estudiantil de Materiales UAeH-SMM

DR. MARIUS RAMIREZ CARDONA
Jefe del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

DRA. PATRICIA DEL CARMEN ZAMBRANO ROBLEDO
Presidenta de la Sociedad Mexicana de Materiales



ICBI Número de control: ICBI-AAC75M/233/2021



La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
a través de la Sociedad Mexicana de Materiales otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a
C.A. Zamora-Valencia

Por su participación en el concurso de carteles científicos presentando el trabajo “Formación de un nanocompuesto C-PeO₂ sintetizado por el método hidrotérmico con propiedades optomagnéticas,” en el marco de actividades del VI Simposio de Investigación en Ciencias de los Materiales y comparte autoría con “M. A. Pérez-Londo, M. I. Reyes-Valderrama, V. Rodríguez-Lugo”, efectuado de manera virtual, organizado por el Capítulo Estudiantil de Materiales durante los días 17 y 18 de junio de 2021



Mineral de la Reforma, Hidalgo., a 29 de junio de 2021.

Atentamente:

“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”

MTRO. MIGUEL ARTEAGA VARELA
Presidente del Capítulo Estudiantil de Materiales UAeH-SMM

DR. MARIUS RAMIREZ CARDONA
Jefe del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

DRA. PATRICIA DEL CARMEN ZAMBRANO ROBLEDO
Presidenta de la Sociedad Mexicana de Materiales



ICBI Número de control: ICBI-AAC75M/234/2021

Congreso “Estatad de investigación en Ciencias de los Materiales”





Encuentro “Participación de la Mujer en la Ciencia”





International Materials Research Congress





Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

Mexico City, April 28th, 2022

August 2021

Carlos Alberto Zomara Valencia

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS e Ingeniería, Área Académica de Ciencias de la Tierra y
Materiales
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

I am pleased to inform you that your contribution "HYDROTHERMAL TREATMENT, CHARACTERIZATION AND TOXICITY EVALUATION OF CARBON QUANTUM DOTS AND MAGNETITE COMPOSITES" by Carlos Alberto Zomara Valencia, María Isabel Reyes Hernández, Gerardo Pérez López, Verónica Rodríguez López presented the contribution **SYNTHESIS OF THE OPTICAL PROPERTIES OF THE QDQ TO THE CHANGE OF SURFACE AND STRUCTURE IN PAPER** modality, in the 32nd Structural Chemical Characterization of Metals and Alloys, has been accepted in symposium 37, Structural and Chemical Characterization of Metals and Alloys, at the 33rd International Materials Research Congress, to be held in Cancun in August 14 - 23, 2022.

The presentation has been accepted in the **Poster Presentation** modality. Remember that in order to include your abstract in the congress program you must confirm your participation no later than May 22th by choosing the modality you will present your abstract(s); you can do this from your IMRC account.

Organizers of the Symposium

"Structural and Chemical Characterization of Metals and Alloys"

Rosario Pérez Cerezo, Antonio Contreras Cuevas, Carlos Alberto León Padilla,
Rodrigo Alonso Esguerra Muñoz.

TO WHOM IT MAY CONCERN

P R E S E N T

This is to certify that Carlos Alberto Zomara Valencia, María Isabel Reyes Hernández, Gerardo Pérez López, Verónica Rodríguez López presented the contribution **SYNTHESIS OF THE OPTICAL PROPERTIES AND FORMATION OF QDQ IN CELLULOSE, SOLUTION IN QDQ** modality, in the 32nd Structural Chemical Characterization of Metals and Alloys Symposium at the 33rd International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 14th to 23th, 2022.

Sincerely,

Jesús González Hernández
President



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2022

Mexico City, May 3th, 2024

TO WHOM IT MAY CONCERN

P R E S E N T

This is to certify that Carlos Alberto Zomara Valencia, María Isabel Reyes Hernández, Gerardo Pérez López, Verónica Rodríguez López presented the contribution **SYNTHESIS OF THE OPTICAL PROPERTIES OF THE QDQ TO THE CHANGE OF SURFACE AND STRUCTURE IN PAPER** modality, in the 32nd Structural Chemical Characterization of Metals and Alloys, has been accepted in symposium 38, Structural and Chemical Characterization of Metals and Alloys, at the 33rd International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 14th to 23th, 2022.

Sincerely,

Jesús González Hernández
President

Carlos Alberto Zomara Valencia

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mexico

I am pleased to inform you that your contribution "STUDY OF THE FORMATION AND STRUCTURE OF FRUIT CARBON QUANTUM DOTS BY HYDROTHERMAL" by Carlos Alberto Zomara Valencia, María Isabel Reyes Hernández, Gerardo Pérez López, Verónica Rodríguez López, has been accepted in symposium 38, Structural and Chemical Characterization of Metals and Alloys, at the 33rd International Materials Research Congress, to be held in Cancun, Mexico in August 14 - 23, 2022.

The presentation has been accepted in the **Oral Presentation** modality. Remember that in order to include your abstract in the congress program you must confirm your participation no later than June 14, 2024 by choosing the modality you will present your abstract(s); you can do this from your IMRC account.

Organizers of the Symposium

"Structural and Chemical Characterization of Metals and Alloys (S38C42)"

Antonio Contreras Cuevas, Gerardo Antonio Rosas Trigo, Andrés Ulises Alvarado Alvarado, Arturo Flores Rentería



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

Mexico City, May 14th, 2022

Carlos Alberto Zomara Valencia

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mexico

I am pleased to inform you that your contribution "CHANGE IN OPTICAL PROPERTIES OF CARBON QUANTUM DOTS FROM PHENOLIC (UNANIONIC COMPOUND 1) FUNCTIONALIZED WITH PMQ" by Carlos Alberto Zomara Valencia, María Isabel Reyes Hernández, Verónica Rodríguez López, has been accepted in symposium 35, Recent Trends in Functionalized Materials, at the 33rd International Materials Research Congress, to be held in Cancun, Mexico in August 14 - 23, 2022.

The presentation has been accepted in the **Poster Presentation** modality. Remember that in order to include your abstract in the congress program you must confirm your participation no later than June 14, 2022 by choosing the modality you will present your abstract(s); you can do this from your IMRC account.

Organizers of the Symposium

"Recent Trends in Functionalized Materials"

Voluntad Subcomisión, David Zúñiga, María de la Luz Olvera, Simón Roberto Sandoval

Nanotech Congress and Annual Meeting of the Condensed Matter & Nanotechnology Division



Simposio Regional de Nanociencia y Nanotecnología en Energía, Salud y Ambiente



Seminario Regional de Materiales Avanzados







abogan el presente

Reconocimiento

a

Carlos Alfredo Zamora Valencia

Por la presentación en plató de manera oral titulada "Efecto del pH y PEG en las propiedades ópticas de las CQDs", cuyos autores son: **C. A. Zamora Valencia, M. J. Reyes Valderama, D. Toledo Lora y V. Rodríguez López**, la cual se llevó a cabo de manera virtual como parte de las actividades del VII Seminario Regional de Materiales Avanzados, organizado por el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.

Mérida de la Reforma, Yucatán, a 4 de octubre de 2024.



M. J. Reyes Valderama
Jefe del Departamento de Ciencias de la Tierra y Materiales



D. Toledo Lora
Jefe del Departamento de Ciencias de la Tierra y Materiales




abogan el presente

Reconocimiento

a

M. en C. Carlos Alfredo Zamora Valencia

Por impartir la conferencia "Formación y cambio en las propiedades de luminiscencia en las CQDs modificando su estructura y superficie", misma que se efectuó el día 3 de octubre de 2023 de manera virtual, durante el VII Seminario Regional de Materiales Avanzados, organizado por el Cuerpo Académico de Materiales Avanzados perteneciente al Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.

Mérida de la Reforma, Yucatán, a 3 de octubre de 2023.



M. J. Reyes Valderama
Jefe del Departamento de Ciencias de la Tierra y Materiales



D. Toledo Lora
Jefe del Departamento de Ciencias de la Tierra y Materiales



V. Rodríguez López
Jefe del Departamento de Ciencias de la Tierra y Materiales

Cursos y talleres

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Exactas e Ingeniería
Unidad de Investigación en Bio-Informática
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Medioambiente
Instituto de Investigación en Bio-Informática

Miércoles de la Reducción, Hgo. a 09 de mayo de 2024

Numero de control: UBA.AAC/18/09/2024
Asunto: Convocatoria de participación en el Capítulo Extranjero IBSA-LAC-AMBA 2024

A QUIEN CORRESPONDA

Por este medio se hace saber que **Zamora Valencia Carlos Alfredo**, asistió al Curso de Caracterización de materiales por microscopía electrónica de transmisión Curso de Física y Tecnología avanzada (CTAFA), dentro del marco de actividades del Tercer Congreso Estatal de Investigación en Ciencias de los Materiales organizado por el Capítulo Extranjero IBSA-LAC-AMBA de manera presencial y con una duración de 3 horas.

Se extiende la presente comunicación para los fines y efectos a los que haya lugar.

Atestando

"Firma, Orden y Progreso"


Dr. Víctor Javier García Hernández
 Presidente del Capítulo Extranjero
 IBSA-LAC-AMBA


Dr. Juan Manuel Sierra Hernández
 Coordinador de Capítulos Extranjeros de
 la Sociedad Mexicana de Materiales


Dr. Julio César Juárez Tapia
 Jefe del Área Académica de Ciencias de la
 Tierra y Medioambiente


Dr. Odilio Arturo Acosta Sánchez
 Director del Instituto de Ciencias Exactas e
 Ingeniería

Unidad de Investigación en Bio-Informática, Carretera Panajuelo
 Toluca-Huamantla, S.F. Carretera Compañeros, kilómetro
 0.5 Huamantla, Hidalgo, México, C.P. 42000
 Teléfono: 0217(7) 11 121 00 00, 0217, 0200
 Fax: 0217
 e-mail: uibio@uaeh.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Exactas e Ingeniería
Unidad de Investigación en Bio-Informática
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Medioambiente
Instituto de Investigación en Bio-Informática

Miércoles de la Reducción, Hgo. a 09 de mayo de 2024

Numero de control: UBA.AAC/18/09/2024
Asunto: Convocatoria de participación en el Capítulo Extranjero IBSA-LAC-AMBA 2024

A QUIEN CORRESPONDA

Por este medio se hace saber que **Zamora Valencia Carlos Alfredo**, asistió al Curso de Introducción a la microscopía electrónica de barrido y microanálisis EDX, impartido el 22 de abril por el M. en C. Martín Fabian García, dentro del marco de actividades del Tercer Congreso Estatal de Investigación en Ciencias de los Materiales organizado por el Capítulo Extranjero IBSA-LAC-AMBA de manera presencial y con una duración de 3 horas.

Se extiende la presente comunicación para los fines y efectos a los que haya lugar.

Atestando

"Firma, Orden y Progreso"


Dr. Víctor Javier García Hernández
 Presidente del Capítulo Extranjero
 IBSA-LAC-AMBA


Dr. Juan Manuel Sierra Hernández
 Coordinador de Capítulos Extranjeros de
 la Sociedad Mexicana de Materiales


Dr. Julio César Juárez Tapia
 Jefe del Área Académica de Ciencias de la
 Tierra y Medioambiente


Dr. Odilio Arturo Acosta Sánchez
 Director del Instituto de Ciencias Exactas e
 Ingeniería

Unidad de Investigación en Bio-Informática, Carretera Panajuelo
 Toluca-Huamantla, S.F. Carretera Compañeros, kilómetro
 0.5 Huamantla, Hidalgo, México, C.P. 42000
 Teléfono: 0217(7) 11 121 00 00, 0217, 0200
 Fax: 0217
 e-mail: uibio@uaeh.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Exactas e Ingeniería
Unidad de Investigación en Bio-Informática
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Medioambiente
Instituto de Investigación en Bio-Informática

Miércoles de la Reducción, Hgo. a 09 de mayo de 2024

Numero de control: UBA.AAC/18/09/2024
Asunto: Convocatoria de participación en el Capítulo Extranjero IBSA-LAC-AMBA 2024

A QUIEN CORRESPONDA

Por este medio se hace saber que **Carlos Alfredo Zamora Valencia**, asistió a las conferencias virtuales impartidas el día 10 de abril 2024, dentro del marco de actividades del Tercer Congreso Estatal de Investigación en Ciencias de los Materiales organizado por el Capítulo Extranjero IBSA-LAC-AMBA de manera presencial y con una duración de 6 horas.

Se extiende la presente comunicación para los fines y efectos a los que haya lugar.

Atestando

"Firma, Orden y Progreso"


Dr. Víctor Javier García Hernández
 Presidente del Capítulo Extranjero
 IBSA-LAC-AMBA


Dr. Juan Manuel Sierra Hernández
 Coordinador de Capítulos Extranjeros de
 la Sociedad Mexicana de Materiales


Dr. Julio César Juárez Tapia
 Jefe del Área Académica de Ciencias de la
 Tierra y Medioambiente


Dr. Odilio Arturo Acosta Sánchez
 Director del Instituto de Ciencias Exactas e
 Ingeniería

Unidad de Investigación en Bio-Informática, Carretera Panajuelo
 Toluca-Huamantla, S.F. Carretera Compañeros, kilómetro
 0.5 Huamantla, Hidalgo, México, C.P. 42000
 Teléfono: 0217(7) 11 121 00 00, 0217, 0200
 Fax: 0217
 e-mail: uibio@uaeh.mx

Organización de eventos



Premios en presentaciones



Revisor de revistas



"Eres más valiente de lo que crees, más fuerte de lo que pareces y más inteligente de lo que piensas"

-Winnie the Pooh