

Caracterización óptica y estructural de puntos cuánticos de carbono a base de tomate (*lycopersicon esculentum* Mill)¹

*Optical and structural characterization of tomato-based carbon quantum dots (*lycopersicon esculentum* Mill)*

Hamilton Alexander Ponce Elías.

Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Estudiante de Doctorado en Ciencias Físicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Laboratorio de Nanotecnología, Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación,
Investigador del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) de la Universidad Francisco Gavidia en El Salvador.
hponce@ufg.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0001-7867-0862>

Jorge Alberto Cuadra Aparicio.

Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Estudiante de Doctorado en Ciencias Físicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Laboratorio de Espectroscopia Óptica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador, El Salvador.
jorge.cuadra@ues.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0002-7562-6599>

Juan Carlos Menjívar Molina.

Estudiante de Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Laboratorio de Espectroscopia Óptica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador, El Salvador.
carlosmenjivarmolina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4946-7846>

¹ Agradecimientos: los autores agradecen a la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID: del inglés *United States Agency for International Development*) y al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento parcial de este trabajo bajo los proyectos 0214405-G2017-024-00 y 09.20, respectivamente. Los autores también agradecen las discusiones y revisiones realizadas por Ricardo Estrada.

Oscar Armando Jorge Deodanes.

Estudiante de Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Laboratorio de Espectroscopia Óptica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador, El Salvador.
JD15002@ues.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0001-9461-3104>

Nelson Fernando Méndez Cisneros.

Estudiante de Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Laboratorio de Espectroscopia Óptica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador, El Salvador.
MC19069@ues.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0002-3639-4641>

Carlos Ernesto Rudamas Flores.

Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Diplom-Physiker, Universidad de Bremen, Alemania.
Doctorado (Eur.) en Física, Universidad de Valencia, España, Escuela Normal Superior de París, Francia, Universidad de Bremen, Alemania.
Laboratorio de Espectroscopia Óptica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador, El Salvador.
Laboratorio de Nanotecnología, Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI), de la Universidad Francisco Gavidia, El Salvador.
carlos.rudamas@ues.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0001-8935-0944>

Fecha de recepción: 12 de agosto de 2022.

Fecha de aprobación: 06 de marzo de 2023.

DOI: <https://doi.org/10.5377/ryr.v1i57.16706>



RESUMEN

Los puntos cuánticos de carbono, poseen propiedades ópticas y electrónicas atractivas para diferentes aplicaciones, por ejemplo, en marcadores biológicos, iluminación y celdas solares. En el presente estudio se reporta la síntesis de estos puntos cuánticos mediante carbonización directa de tomate y su caracterización utilizando microscopía electrónica de barrido, dispersión de energías de rayos X y espectroscopia óptica. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido muestran tamaños de puntos cuánticos entre 20 nm y 60 nm. En los espectros de absorción se ha observado una banda predominante a 275 nm atribuida a transiciones asociadas con grupos funcionales y transiciones $\pi-\pi^*$ de los enlaces C=C y $n-\pi^*$ de los enlaces C=O. Por otra parte, en los espectros de fotoluminiscencia se observaron al menos cuatro bandas, con máximos alrededor de 650 nm, 580 nm, 560 nm y 500 nm. Esta emisión multibanda podría asociarse, preliminarmente, a transiciones de trazas de silicio, azufre y potasio que se han observado por dispersión de energías de rayos X en las diferentes muestras.

Palabras clave: tomate, puntos cuánticos de carbono, carbonización, fotoluminiscencia, absorción, microscopía electrónica.

ABSTRACT

Carbon quantum dots possess attractive optical and electronic properties for different applications, for example, in biological markers, illumination and solar cells. In the present study it is reported the synthesis of these quantum dots by direct carbonization of tomato and their characterization using scanning electron microscopy, X-ray energy dispersive and optical spectroscopy. The scanning electron microscopy images show quantum dot sizes between 20 nm and 60 nm. In the absorption spectra, a predominant band at 275 nm attributed to transitions associated with functional groups and $\pi-\pi^$ transitions of C=C bonds and $n-\pi^*$ transitions of C=O bonds has been observed. On the other hand, at least four bands were observed in the photoluminescence spectra, with maxima around 650 nm, 580 nm, 560 nm and 500 nm. This multiband emission could be associated, preliminarily, to transitions of silicon, sulfur and potassium traces that have been observed by energy dispersive X-ray in the different samples.*

Keywords: tomato, carbon quantum dots, carbonization, photoluminescence, absorption, electron microscopy.

Introducción

Los puntos cuánticos de carbono (CQDs: del inglés *Carbon Quantum Dots*) son conocidos por sus propiedades únicas, como su excelente emisión de luz, foto-estabilidad, biocompatibilidad, solubilidad en agua, absorción y emisión sintonizable, y baja toxicidad. Estas características hacen que los CQDs sean muy buenos candidatos para aplicaciones fotovoltaicas, iluminación, biodetección, liberación de fármacos, y catálisis, entre otras aplicaciones de interés (Cuadra *et al.*, 2018; Deodanes *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2019). Cuadra *et al.* (2018) reportaron dos bandas de absorción, con máximos centrados alrededor de 230 nm y 350 nm para este tipo de nanoestructuras. Dichas bandas han sido asociadas a transiciones $\pi-\pi^*$ (CC) y $n-\pi^*$ (OC) utilizando la Teoría del Funcional de Densidad (DFT: del inglés *Density Functional Theory*). Estos autores también reportaron una banda de absorción adicional alrededor de 450 nm en CQDs dopados con nitrógeno, la cual ha sido asociada a transiciones $n\rightarrow\pi^*$ (NC). Además, en sus respectivos espectros de fotoluminiscencia (PL: del inglés *Photoluminescence*), se observa una banda de emisión intensa entre 400 nm y 800 nm. Esta banda es atribuida a la combinación de la emisión de radiación electromagnética por núcleos de carbono, defectos superficiales y/o estados moleculares (grupos funcionales de superficie). Sin embargo, el origen de esta banda aún se encuentra en debate, como ha sido discutido por diferentes autores (Carbonaro *et al.*, 2019; Dong y Huang, 2019; Wang *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020). Esta emisión puede ser sintonizada mediante diferentes métodos, dentro de los que se pueden mencionar la ingeniería de solventes, introducción de precursores de carbono conjugado, el dopaje con diferentes átomos y la regulación de defectos superficiales (Jiang *et al.*, 2019; Mohammad-Jafarih *et al.*, 2021). Se ha reportado que usando los métodos de ingeniería de solvente y dopamiento químico, se pueden generar múltiples bandas de emisión en estas nanoestructuras (Huo *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2019; Saengsrichan *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2019). Similarmente, la absorción de los CQDs también puede ser sintonizada (Huo *et al.*, 2021). Estas observaciones son de mucha importancia para aplicaciones optoelectrónicas (Cuadra *et al.*, 2018).

Actualmente, los CQDs pueden obtenerse mediante diferentes métodos, dentro de los cuales se pueden mencionar la exfoliación química, ablación láser, síntesis por microondas, pirólisis/carbonización y deposición química en fase vapor, entre otras (Cui *et al.*, 2021). En los últimos años, la preparación de CQDs utilizando como materia prima algunos productos naturales (como limón, manzana, tomate, pétalos de rosa y agua de coco) ha llamado la atención debido a su bajo costo, poca toxicidad, simplicidad y por las buenas propiedades ópticas de las nanoestructuras que se obtienen en el rango visible (He *et al.*, 2018; Borna *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2019; Manoharan *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021). Esto promete ser una vía para el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente (Semeniuk *et al.*, 2019).

En el presente trabajo se reportan los resultados de la caracterización óptica y estructural de CQDs obtenidos por carbonización directa de tomate. La caracterización estructural se ha realizado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM: del inglés *Scanning Electron Microscopy*) y por dispersión de energías de rayos-X (EDX: del inglés *Energy Dispersive X-Rays*). La caracterización óptica se efectuó mediante espectroscopia de absorción y PL.

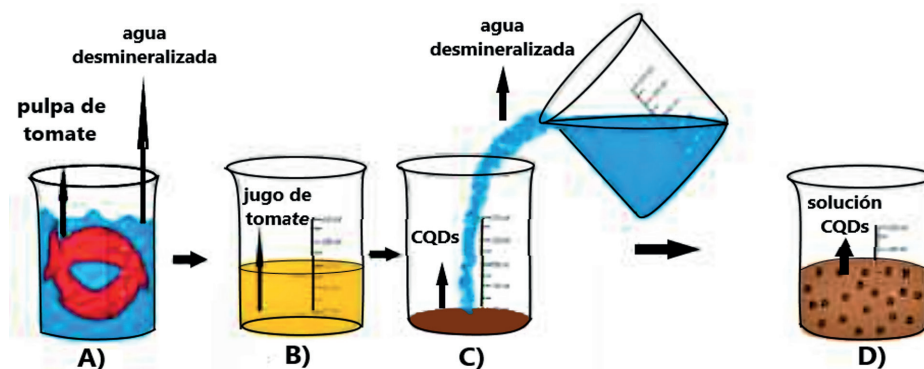
Metodología

Síntesis

La síntesis de los CQDs se realizó utilizando el método de carbonización directa, similar a lo descrito por otros autores (Wang *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2021; Cuadra *et al.*, 2018). Para este fin, se utilizó un tomate de ensalada (*solanum lycopersicum*) adquirido en un supermercado local. Se procedió a carbonizarlo de la siguiente forma: i) Se removió la cáscara y las semillas del tomate; ii) La pulpa resultante se depositó en un vaso de precipitado, agregándole agua desmineralizada hasta que la mezcla alcanzara un volumen de 250 ml, como se representa esquemáticamente en la Figura 1A; iii) La solución expuesta al aire libre se calentó a 100 °C, durante 40 minutos en una placa caliente (conocida en inglés como *Hot Plate*); iv) Se retiró el vaso de precipitado de la placa caliente y se dejó enfriar a temperatura ambiente, luego, la pulpa del jugo de tomate se filtró utilizando papel filtro; v) El jugo de tomate obtenido se depositó en otro vaso de precipitado y similarmente al paso iii), se calentó a una temperatura constante de 100 °C; vi) Se agregaron 10 ml de agua desmineralizada cuando se observó un cambio de coloración, la solución se volvió de un color marrón, lo cual se le puede atribuir a la presencia de CQDs (esto ocurrió cuando el jugo de tomate se evaporó casi por completo), tal como se representa esquemáticamente en la Figura 1B y 1C, este último procedimiento se repitió tres veces y finalmente se dejó enfriar, tal como se describe en el paso iv); vii) Finalmente, los CQDs sintetizados se dispersaron en agua desmineralizada, como se representa en la Figura 1D.

Figura 1

Representación esquemática del proceso de síntesis de los CQDs.



Notas:

A= Pulpa de tomate en agua desmineralizada a 100 °C.

B= Jugo del tomate obtenido de la filtración de A.

C= Producto de carbonización del jugo de tomate luego de mantener la solución en B a 100 °C durante un tiempo y posterior adición de agua desmineralizada.

D= Solución que contiene los CQDs.

Fuente: elaboración propia.

Método de separación de fases heterogéneas

En este método, se agregó alcohol isopropílico a la solución que contiene los CQDs, a una razón (cantidad de agua-CQDs)/(cantidad de alcohol) = 1.5, para que se formen dos fases, una gelatinosa y otra líquida, similar a lo observado por Zhan *et al.* (2019). De la fase líquida se tomó una muestra que se denomina solución A. Luego se extrajo otra muestra de la fase gelatinosa que se exprimió hasta obtener una consistencia sólida, esta se separó en dos alícuotas sólidas. Una se disolvió en agua desmineralizada y se denominó solución B, y a la otra alícuota sólida se le agregó 4 ml de benceno en un tubo de ensayo agitándolo hasta que se disolviera. Esta última solución se denominó solución C. Las soluciones fueron etiquetadas para posteriormente ser caracterizadas sin ningún procedimiento adicional al descrito anteriormente.

SEM y EDX

Para la determinación de los tamaños de los CQDs, se utilizó un equipo SEM, modelo VEGA-3w de la marca TESCAN. Para realizar las observaciones mediante esta técnica se tomó de cada solución una gota que se diluyó en 20 gotas de agua desmineralizada. Luego se depositó una gota de esta nueva solución, sobre portamuestras de aluminio que se habían pulido previamente. Se dejó secar a temperatura ambiente y posteriormente se realizó un recubrimiento con una capa de oro-paladio mediante la técnica de pulverización catódica (conocida en inglés como *Sputtering*), para obtener una mejor conductividad.

Para las medidas de composición química, se utilizó un equipo EDX, modelo X-act de la marca Oxford Instruments, con un detector de deriva de silicio (SDD: del inglés *Silicon Drift Detectors*). Este equipo está incorporado al microscopio electrónico SEM. Para realizar las observaciones mediante esta técnica se centrifugó la solución A para obtener un precipitado sólido que se depositó sobre una cinta adhesiva de carbono, previamente adherida al portamuestras de aluminio. Esta cinta de doble cara, es un sustrato de fondo ideal para observar la muestra por medio de EDX, ya que reduce en gran medida el valor de los rayos X de fondo (principalmente de la radiación secundaria), mejorando la precisión de la observación. Luego la muestra fue secada a temperatura ambiente y posteriormente recubierta con una capa conductora de oro-paladio mediante pulverización catódica. Este mismo proceso se aplicó a las soluciones B y C.

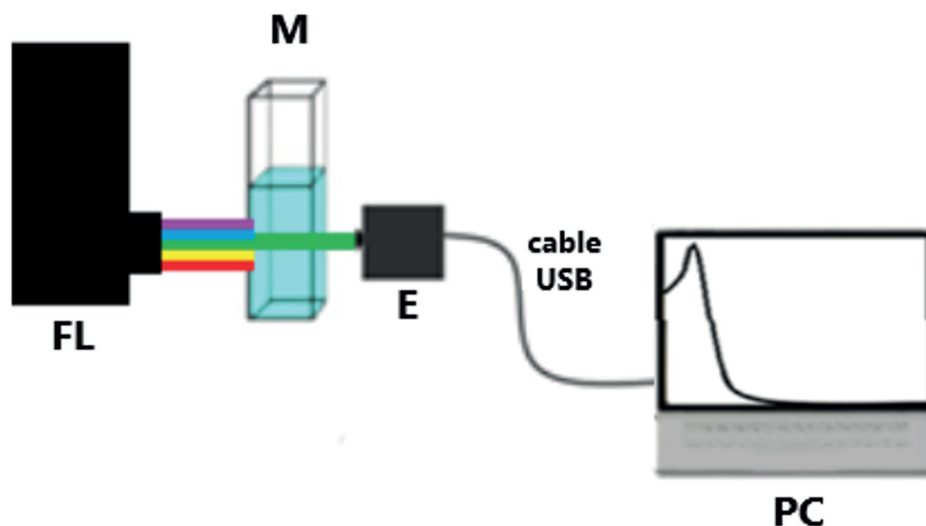
Espectroscopia de absorción

Para la toma de espectros de absorción, se utilizó un montaje experimental cuyo esquema se muestra en la Figura 2. Como fuente de luz (FL) se utilizó una lámpara de tungsteno-deuterio, modelo DT-MINI-2 de la marca Ocean Optics. La luz transmitida a través de una celda de cuarzo que contenía la solución (M), era enviada directamente hacia un espectrógrafo (E) modelo USB4000-UV-VIS, de la marca Ocean Optics. La configuración del espectrógrafo es del tipo Czerny-Turner cruzado con una distancia focal de 42 mm de entrada y de 68 mm de salida y una apertura de entrada de 25 μm . El espectrógrafo tiene incorporado un

dispositivo de carga acoplada (CCD: del inglés *Charge Coupled Device*) lineal modelo Toshiba TCD1304AP, con 3648 píxeles, que sirve como detector. La resolución del espectrógrafo, expresada en longitudes de onda, es de aproximadamente 0.9 nm y es capaz de detectar en una ventana espectral entre 200 nm y 850 nm. La señal colectada por la CCD es enviada a una computadora personal, vía un convertidor analógico/digital (A/D) de 16 bit y 3 MHz, que también está integrado en el espectrógrafo.

Figura 2

Esquema del montaje experimental para la realización de las medidas de absorción.



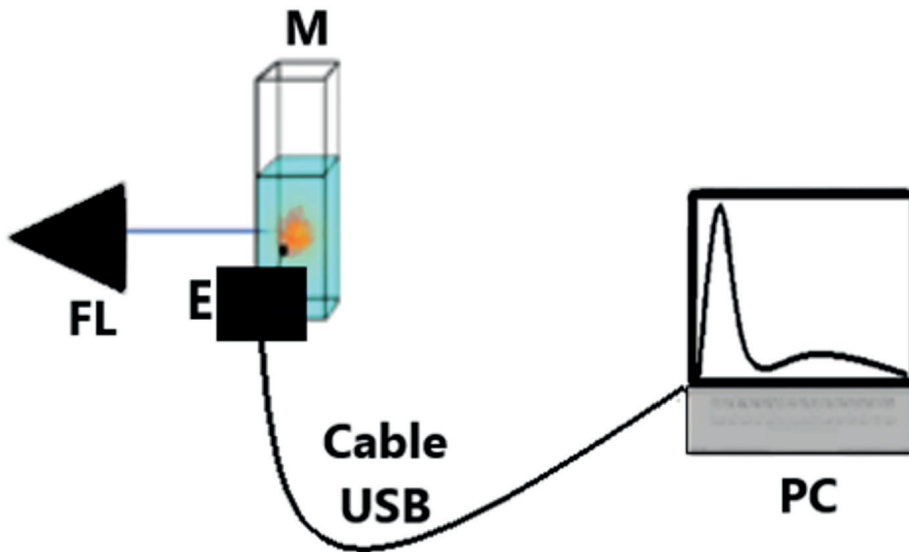
Nota: se muestra la fuente de luz (FL) FL, la solución medida (M), el espectrógrafo y la computadora (PC).
Fuente: elaboración propia.

Fotoluminiscencia

Para la toma de espectros de PL, se utilizó un montaje experimental cuyo esquema se muestra en la Figura 3. Como fuente de excitación se utilizó un diodo emisor de luz (LED: del inglés *Light Emitting Diode*) de la marca Chanzon, con un máximo de emisión en aproximadamente 365 nm. Luego de la excitación, la luz emitida por la muestra (M), fue colectada directamente por un espectrógrafo a 90 grados, respecto a la dirección del haz de excitación. El espectrógrafo, modelo USB4000-FL de la marca Ocean Optics tenía una apertura de entrada de 200 micrómetros con una resolución alrededor de los 10 nm y una ventana espectral de detección entre 360 nm y 1100 nm. Las longitudes focales del espectrógrafo, la CCD y el convertidor A/D son similares al espectrógrafo utilizado para las medidas de absorción.

Figura 3

Esquema del montaje experimental para la realización de las medidas de PL.



Nota: se muestra la fuente de luz (FL), la solución medida (M), el espectrógrafo (E) y la computadora personal (PC).
Fuente: elaboración propia

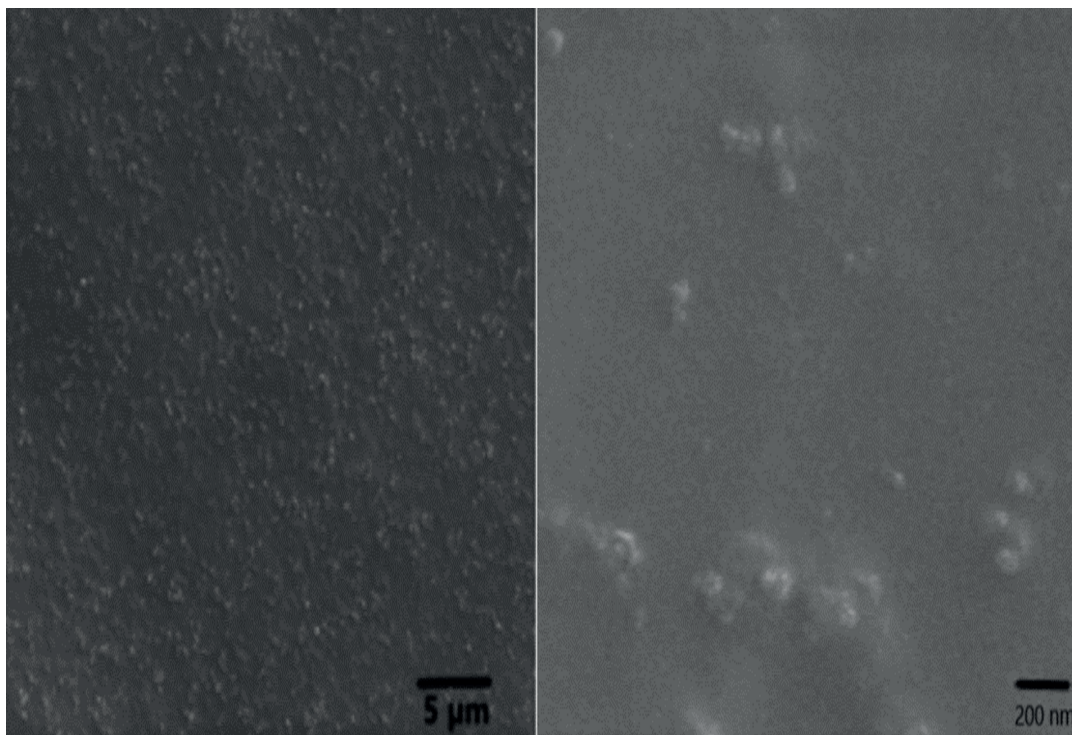
Resultados y discusión

Para preparar las soluciones A, B y C, se utilizaron 150 gramos de pulpa de tomate, que se sometió al proceso de carbonización descrito en la metodología. Como resultado, se obtuvieron 7 gramos de un sólido color marrón-oscuro con un olor poco intenso a quemado. Posteriormente, se diluyó este sólido en agua desmineralizada, lo que ocasionó una muestra de color marrón-claro. A esta muestra se le aplicó el método de separación descrito en el Método de separación de fases heterogéneas.

En la Figura 4 se presentan imágenes SEM correspondiente a CQDs de la solución B, donde se puede apreciar la escala utilizada (5 micrómetros y 200 nanómetros). Es evidente la presencia de algunos conglomerados, que también fueron observados en las soluciones A y C. La mayoría de los CQDs poseen diámetros entre 20 nm y 60 nm con una media aproximada de 40 nm. Este es un rango de tamaño de partícula mayor que el reportado por Liu *et al.* (2021) para CQDs de tomate. Estos autores reportaron tamaños entre 10 nm y 50 nm, con una media de 30 nm. Por lo anteriormente expuesto, pueden aparecer algunas diferencias en las propiedades ópticas de las muestras estudiadas en este trabajo y las reportadas por Liu *et al.* (2021).

Figura 4

Imágenes SEM de una muestra de la solución B, utilizando una escala de 5 micrómetros (izquierda) y una de 200 nanómetros (derecha).



Fuente: elaboración propia.

En la solución A se observaron otras estructuras de mayor tamaño, incluso mayores a la micra. Sin embargo, siempre se pudo observar una mayor presencia de CQDs con tamaños entre los 20 nm y 60 nm.

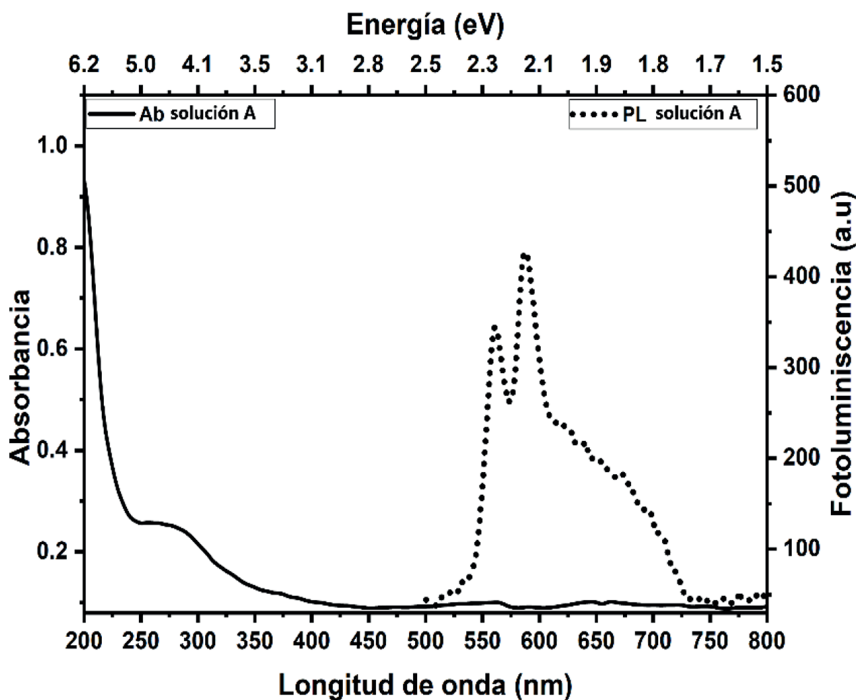
Las tres soluciones A, B y C fueron también caracterizadas mediante espectroscopia óptica de absorción y PL. En la Figura 5, se muestra con una línea continua el espectro de absorción y con una línea punteada el espectro de PL, correspondiente a la solución A. En el espectro de absorción se puede apreciar una banda ancha en el rango de 225 nm a 325 nm, con un máximo aproximadamente en 275 nm. La convolución de varias sub-bandas, ya reportadas en la literatura, podría explicar su origen. Por ejemplo, la absorción en este rango espectral se atribuye normalmente a transiciones ópticas que se dan en grupos funcionales en las muestras, a transiciones $\pi-\pi^*$ de los enlaces C=C y transiciones $n-\pi^*$ de los enlaces C=O (He *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2017).

En los espectros de PL, se observan tres bandas de emisión, dos con máximos centrados aproximadamente en 560 nm y 580 nm y una banda ancha centrada aproximadamente en 650 (véase línea punteada en

la Figura 5). Debido a esto, y con el fin de estudiar su posible origen, se realizaron medidas EDX. Los resultados indican la presencia mayoritaria de carbono, así como azufre, potasio, silicio, calcio y magnesio en menores cantidades. Este resultado podría indicar que la emisión multibanda podría asociarse preliminarmente a transiciones ópticas relacionadas con la presencia de estos elementos en el jugo de tomate. Por otro lado, transiciones ópticas asociadas a la presencia de diferentes grupos funcionales superficiales tales como O–H y COO podrían contribuir en la formación de esta banda ancha (Liu *et al.*, 2017).

Figura 5

Espectro de absorción de obtenido para los CQDs de la solución A (línea continua) y su correspondiente espectro de fotoluminiscencia (línea punteada).

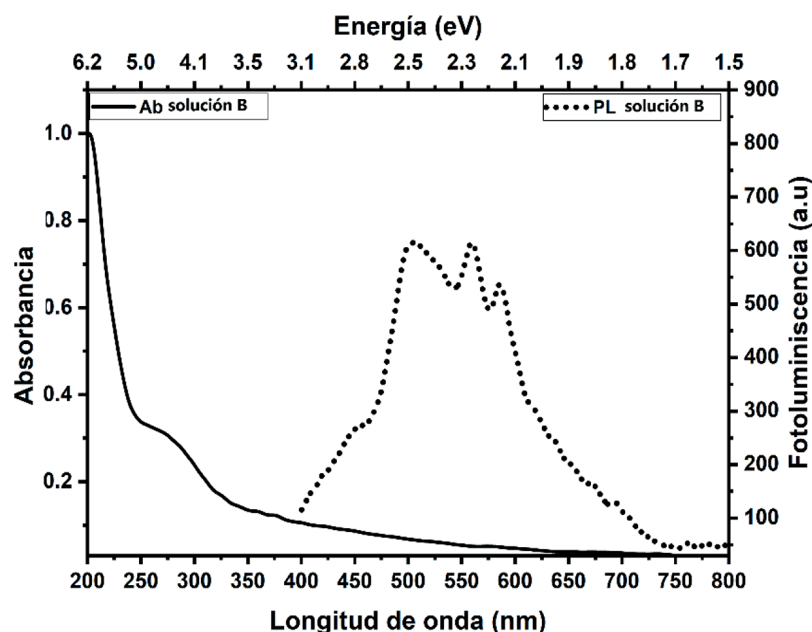


Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se pueden observar el espectro de absorción y de PL obtenidos para la solución B como una línea continua y punteada, respectivamente. El espectro de absorción parece tener la misma banda centrada aproximadamente a 275 nm, que ya se había observado en el espectro de absorción de la solución A. Este resultado se esperaba obtener debido a que son muestras de soluciones derivadas de la misma síntesis.

Figura 6

Espectros de absorción (línea continua) y fotoluminiscencia (línea punteada) de una muestra de la solución B.



Fuente: elaboración propia.

En los espectros de PL de la solución B se observan cinco bandas. Tres de ellas con máximos en 560 nm, 580 nm y 650 nm, similar a lo observado en los espectros de la solución A y dos bandas adicionales, centradas en 450 nm y 500 nm, cuyo origen se podría asociar a transiciones ópticas relacionadas con grupos funcionales de compuestos orgánicos, como ha sido observado por otros autores (Liu *et al.*, 2017) y al efecto de la presencia de S, K, Si, Ca y Mg, detectados por EDX en este trabajo y reportado por otros autores (Saengsrichan *et al.*, 2022). Por otro lado, también se podría atribuir a efectos de solvente, que han sido reportados recientemente (Mohammad-Jafarih *et al.*, 2021).

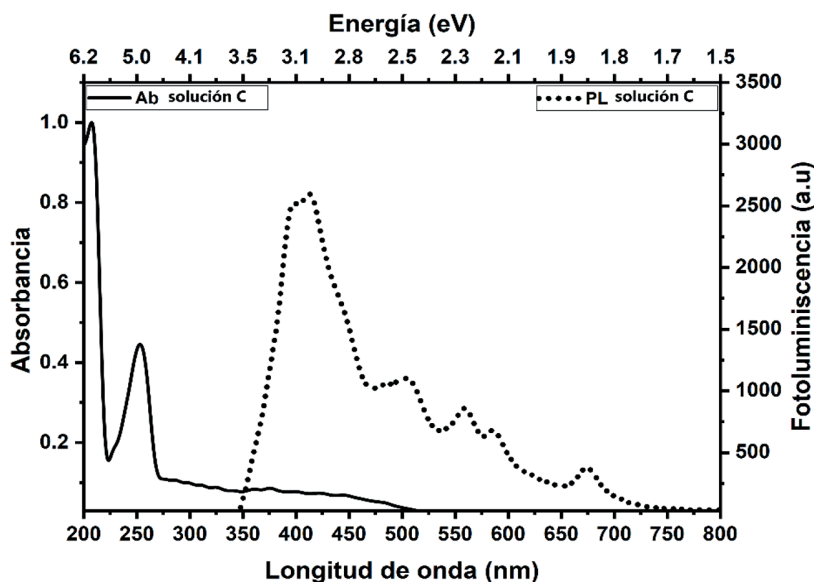
Los grupos funcionales podrían ser los causantes de la formación de conglomerados que permiten separar una parte de la solución en fase sólida. Esta separación se observó también al dejar reposar las soluciones justo después de la síntesis y de haberlas disuelto nuevamente en agua desmineralizada (sin agregar alcohol isopropílico). Es por esto que el alcohol isopropílico se podría considerar como un acelerador de la precipitación de estas estructuras que son poco solubles en agua desmineralizada. Lo anterior podría indicar la presencia de muestras que posiblemente difieren en los grupos funcionales que poseen.

En la Figura 7 se muestran espectros de absorción y fotoluminiscencia obtenidos para la solución C. En el espectro de absorción (línea continua) se observa una banda centrada en 250 nm, es decir, 25

nm desplazada hacia el azul, si se compara con las bandas de absorción observadas para las soluciones A y B en esta región. Este desplazamiento, hacia longitudes de onda corta, podría asociarse a efectos de solvente.

Figura 7

Espectros de absorción (línea continua) y fotoluminiscencia (línea punteada) obtenidos para la solución C.



Fuente: elaboración propia.

En el espectro de PL de la solución C, se observan 8 bandas centradas aproximadamente en 400 nm, 425 nm, 445-450 nm, 500 nm, 560, 580 nm, 650 nm y 675 nm. Las bandas centradas alrededor de 500 nm, 560, 580 nm y 650 nm, ya han sido descritas, en principio, dentro del marco de la emisión multibanda descrita para las muestras de las soluciones A y B. Las bandas con máximos alrededor de 400 nm, 425 nm y 675 nm podrían tener su origen en transiciones ópticas relacionadas con complejos de transferencia de carga (CT: del inglés *Charge-Transfer*), similar a lo descrito por Basak *et al.*(2014). Mientras que la banda a 445-450 nm podría tener su origen en transiciones ópticas relacionadas, por una parte, a complejos CT y, por otra parte, a transiciones ópticas relacionadas con grupos funcionales, como se ha descrito antes. Al realizar el cambio de solvente se observó un cambio de coloración que se presenta típicamente en soluciones en las que se forman estos complejos.

Otro resultado interesante observado, y que será discutido en futuras publicaciones, es la mayor intensidad de las bandas de PL que aparecen a menores longitudes de onda, como puede observarse en la Figura 7.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una síntesis de CQDs, a partir de la carbonización directa de jugo de tomate utilizando un método simple y de bajo costo. En los espectros de PL de estas nanoestructuras sintetizadas, se observó que estos están compuestos por múltiples bandas, las cuales podrían tener su origen en transiciones ópticas relacionadas al dopaje con los diferentes compuestos químicos presentes en el tomate. Por otra parte, también se ha encontrado la posible formación de complejos CT que puede permitir la sintonización de los espectros de absorción y fotoluminiscencia de estas nanoestructuras. Estos resultados concuerdan con los reportados por otros autores, como se describe en la sección anterior; además, parecen ser prometedores para aplicaciones amigables con el medio ambiente, como celdas solares y diodos emisores de luz. Sin embargo, los resultados presentados en este trabajo deben considerarse preliminares y ser sometidos a estudios más profundos.

Referencias

- Basak, S., Bhattacharya, S., Datta, A., y Banerjee, A. (2014). Charge-transfer complex formation in gelation: the role of solvent molecules with different electron-donating capacities. *Chem. Eur. J.*, 20, 5721 – 5726. <https://doi.org/10.1002/chem.201303889>
- Borna, S., Sabzi, R. E., y Pirsá, S. (2021). Synthesis of carbon quantum dots from apple juice and graphite: investigation of fluorescence and structural properties and use as an electrochemical sensor for measuring Letrozole. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 10866–10879. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05745-5>
- Carbonaro, C. M., Corpino, R., Salis, M., Mocci, F., Thakkar, S. V., Olla, C., y Ricci, P. C. (2019). On the emission properties of carbon dots: reviewing data and discussing models. C — *Journal of Carbon Research*, 5, 1-15. <https://doi.org/10.3390/c5040060>
- Cuadra, J., Ponce, H., y Rudamas, C. (2018). Optical properties of graphene carbon quantum dots for solar cells applications. *Proceedings of IEEE 2018 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII)*, (p. 1-5). San Salvador, El Salvador. [doi: 10.1109/CONCAPAN.2018.8596611](https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2018.8596611).
- Cui, L., Ren, X., Sun, M., Liu, H., y Xia, L. (2021). Carbon dots: synthesis, properties and applications. *Nanomaterials*, 11, 2-38. <https://doi.org/10.3390/nano11123419>
- Deodanes, O., Molina, J. C., Violantes, C., Pleitez, D., Cuadra, J., Ponce, H., y Rudamas, C. (2020). White light emitting CdS quantum dot devices coated with layers of graphene carbon quantum dots. *MRS Avances*, 5, 3337 - 3343.

- He, M., Zhang, J., Wang, H., Kong, Y., Xiao, Y., y Xu, W. (2018). Material and optical properties of fluorescent carbon quantum dots fabricated from lemon juice via hydrothermal reaction. *Nanoscale Research Letters*, 13, 1-7. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2581-7>
- Huo, X., Shen, H., Liu, R., y Shao, J. (2021). Solvent effects on fluorescence properties of carbon dots: implications for multicolor imaging. *ACS Omega*, 6, 26499-26508. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03731>
- Jiang, K., Feng, X., Gao, X., Wang, Y., Cai, C., y Li, Z. (2019). Preparation of multicolor photoluminescent carbon dots by tuning surface states. *Nanomaterials*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.3390/nano9040529>
- Liu, W., Li, C., Sun, X., Pan, W., Yu, G., y Wang, J. (2017). Highly crystalline carbon dots from fresh tomato: UV emission and quantum confinement. *Nanotechnology*, 28, 1-18. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa900b>
- Liu, H., Li, Z., Zhang, W., Liu, Y., Pan, R., y Huang, G. (2021). Facile synthesis of tomato-based carbon nanodots and its utilization in sensitive detection of and its utilization in sensitive detection of tartrazine. *Research Square*, 1-15. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1080223/v1>
- Manoharan, P., Dhanabalan, S. C., Alagan, M., Muthuvijayan, S., Ponraj, J. S., y Somasundaram, C. K. (2020). Facile synthesis and characterisation of green luminescent carbon nanodots prepared from tender coconut water using the acid-assisted ultrasonic route. *Micro & Nano Letters*, 15, 920-924. <https://doi.org/10.1049/mnl.2020.0101>
- Mohammad-Jafarih, P., Akbarzadeh, A., Salamat-Ahangari, R., Pourhassan-Moghaddam, M., y Jamshidi-Ghaleh, K. (2021). Solvent effect on the absorption and emission spectra of carbon dots: evaluation of ground and excited state dipole moment. *BMC Chemistry*, 15, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13065-021-00779-6>
- Qin, Z., Wang, W., Wen, M., Zhang, R., Zhang, Q., Li, K., Li, J., Yang, W., y Zhou, Y. (2019). Multicolor emissive sulfur, nitrogen co-doped carbon dots and their application in ion detection and solid lighting. *Journal Pre-proof*, 229, 117859. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117859>
- Saengsrichan, A., Saikate, C., Silasana, P., Khemthong, P., Wanmolee, W., Phanthasri, J., Youngjan, S., Posoknistakul, P., Ratchahat, S., Laosiripojana, N., Wu K y Sakdaronnarong, C. (2022). The role of N and S doping on photoluminescent characteristics of carbon dots from palm bunches for fluorimetric sensing of Fe³⁺ Ion. *Int. J. Mol. Sci*, 23, 5001. <https://doi.org/10.3390/ijms23095001>

- Sharma, V., Singh, S. K., y Mobin, S. M. (2019). Bioinspired carbon dots: from rose petals to tunable emissive nanodots. *Nanoscale Adv*, 1, 1290–1296. <https://doi.org/10.1039/C8NA00105G>
- Semeniuk, M., Yi, Z., Poursorkhabi, V., Tjong, T., Jaffer, S., Lu, Z-H., y Sain, M., (2019). Future perspectives and review on organic carbon dots in electronic applications. *ACS Nano*, 25, 6224–6255 <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b00688>
- Wang, H., Sun, P., Cong, S., Wu, J., Gao, L., Wang, Y., Dail, X., Yi1, Q., y Zou, G. (2016). Nitrogen-doped carbon dots for “green” quantum dot solar cells. *Nanoscale Research Letters*, 11, 27. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1231-1>
- Wang, X., Feng, Y., Dong, P., y Huang, J. (2019). A mini review on carbon quantum dots: preparation, properties, and electrocatalytic application. *Frontiers in Chemistry*, 7, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00671>
- Zhan, J., Peng, R., Wei, S., Chen, J., Peng, X., y Xiao, B. (2019). Ethanol-precipitation-assisted highly efficient synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots from chitosan. *ACS Omega*, 4, 22574–22580. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03318>
- Zhao, D., Liu, X., Zhang, Z., Zhang, R., Liao, L., Xiao, X., y Cheng, H. (2019). Synthesis of multi-color carbon dots based on solvent control and its application in the detection of crystal violet. *Nanomaterials*, 9, 1556. <https://doi.org/10.3390/nano9111556>
- Zhao, Q., Song, W., Zhao, B., y Yang, B. (2020). Spectroscopic studies of the optical properties of carbon dots: recent advances and future prospects. *Mater. Chem. Front.*, 4, 472-488. <https://doi.org/10.1039/C9QM00592G>