

Aprovechamiento de residuos orgánicos para la síntesis de nanopartículas metálicas funcionales

Carlos Enrique Escárcega-González^{a,b*}, Estefanía Caballero-Oyervides^a, Javier Emanuel Castañeda-Aude^{a,b}, Brenda Ureña-Castillo^{a,b}, José Rubén Morones-Ramírez^{a,b}, Enrique Díaz Barriga-Castro^c.

^a Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ciencias Químicas. Av. Universidad s/n. CD. Universitaria, 66455, San Nicolás de los Garza, NL, México. E-mail: carlos.escarcegazz@uanl.edu.mx

^b Centro de Investigación en Biotecnología y Nanotecnología, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, Km. 10 autopista al Aeropuerto Internacional Mariano Escobedo, Apodaca, Nuevo León 66629, México.

^c Centro de Investigación en Química Aplicada, CIQA. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140, Saltillo, Coahuila 25294, México.

* E-mail: carlos.escarcegazz@uanl.edu.mx

Recibido 17 diciembre 2021, Aceptado 28 enero 2022

Resumen

El aumento de la población y sus actividades con el consiguiente desarrollo del ser humano, ha propiciado la generación y acumulación de mayores cantidades de residuos como los de tipo orgánico que pueden impactar de manera negativa al medio ambiente. Por ello, es importante fomentar estrategias más eficientes de gestión y disposición final para este tipo de residuos. Al respecto, debido a su naturaleza orgánica, estos residuos pueden contener diversos compuestos de interés que pueden ser aplicados en áreas como la nanotecnología, medicina, medio ambiente, alimentaria, farmacéutica, entre otras., por lo que su revalorización es una alternativa viable para su aprovechamiento. En este sentido, la síntesis verde de nanopartículas metálicas con propiedades interesantes tales como: antimicrobianas, antioxidantes, catalizadoras, anticancerígenas, etc, ha mostrado ser una metodología de obtención de dichos nanomateriales de una manera más amigable con el medio ambiente y con una mejor relación costo/beneficio. Para tal efecto, se requieren agentes reductores y estabilizadores por medio de seres vivos o sus partes, los cuales pueden ser obtenidos a partir de extractos de residuos orgánicos, ya que éstos poseen compuestos tales como fenólicos antioxidantes eficientes para reducir y estabilizar soluciones de sales metálicas con la consiguiente producción de sus respectivas nanopartículas. Por lo tanto, el aprovechamiento de residuos orgánicos para la síntesis verde de nanopartículas metálicas funcionales representa una alternativa viable y adecuada en la búsqueda de mejores estrategias de manejo, gestión y disposición final de estos residuos, así como mitigar los impactos al medio ambiente, obteniendo a la par nanomateriales con potenciales beneficios en diversas áreas relevantes para la sociedad.

Palabras clave: Residuos orgánicos, polifenoles, nanopartículas metálicas.

Abstract

The increase of population and its activities with the consequent development of the human beings, has led to the generation and accumulation of greater amounts of residues, such as organic waste that can negatively impact the environment. For this reason, it is important to promote more efficient management and final disposal strategies for this type of waste. In this regard, due to its organic nature, these residues may contain various compounds of interest that can be applied in areas such as nanotechnology, medicine, environment, food, pharmaceutical, among others. Thus, its reevaluation is a viable alternative for its use. In this sense, the green synthesis of metallic nanoparticles with interesting properties such as: antimicrobial, antioxidant, catalytic, anticancer, etc., has proven to be a methodology for obtaining said nanomaterials in a more environmentally friendly way and with a better cost-benefit relationship. For this purpose, reducing and stabilizing agents are required by means of living beings or their parts, which can be obtained from extracts of organic waste, since these have compounds such as phenolic antioxidants that are efficient to reduce and stabilize solutions of metal salts, with the consequent production of their respective nanoparticles. Therefore, the use of organic waste for green synthesis of functional metallic nanoparticles represents a viable and adequate alternative in search of better handling, management and final disposal strategies of these type of waste, also contributing to the mitigation of negative impacts on the environment, and obtaining at the same time, nanomaterials with potential benefits in different relevant areas to society.

Keywords: Organic residues, polyphenols, metallic nanoparticles.

1. Los residuos orgánicos y su problemática ambiental

El desperdicio de alimentos es un problema importante en la actualidad debido a que esto representa, a su vez, el desperdicio de otros recursos, siendo agua y energía los más significativos,

durante las etapas de la cadena de suministro de alimentos. Según datos de la Naciones Unidas en su Objetivo de Desarrollo Sostenible número 12, Aproximadamente un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano se desperdicia en todo el mundo, lo que equivale a alrededor de 1,300 millones de toneladas anuales [1].

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, las frutas y verduras, además de las raíces y los tubérculos, tienen las tasas de desperdicio más altas de todos los alimentos [2]. En efecto, se ha reportado una pérdida entre 40-50% de este grupo de alimentos, contribuyendo con el mayor nivel de desperdicios al respecto. [3, 4].

Solamente en América del Norte se desperdicia aproximadamente 265 millones de toneladas anuales de alimentos, donde México ocupa el segundo lugar en volumen de residuos orgánicos desperdiciados por país con una cifra de 38 millones de toneladas anuales [5].

Este problema ha generado un gran impacto económico y al medio ambiental en el mundo, debido a que, al descomponerse, los residuos orgánicos provenientes de frutas y verduras emiten gases de efecto invernadero y producen líquidos lixiviados, generando así contaminación de aire, suelo, agua superficial y acuíferos, contribuyendo además de manera negativa y significativa con el cambio climático. Por si fuera poco, el pronóstico sugiere que para satisfacer la futura demanda se debe aumentar la producción de frutas y verduras sin considerar las pérdidas actuales. [6, 7].

2. Aprovechamiento y revalorización de los residuos orgánicos

En este contexto, se han tomado medidas para dar una segunda utilidad y revalorizar los desperdicios de frutas y verduras con la finalidad de disminuir el impacto ambiental involucrado con el manejo tradicional de este tipo de residuos. En México, se calcula que el 93% de los residuos orgánicos son destinados para su disposición final en rellenos sanitarios de tierra controlados o no controlados, así como tiraderos al aire libre que afectan al medio ambiente, siendo solo el 7% restante de los residuos orgánicos los que son aprovechados para otros usos. [5].

Al respecto, se ha intentado aprovechar los residuos orgánicos mediante diferentes actividades que produzcan beneficios económicos y que disminuyan los efectos negativos al medio ambiente. Sin embargo, para ello se tiene que llevar a cabo un manejo adecuado de residuos orgánicos, y así mismo, se tienen que enfrentar desafíos relacionados. En el caso de México, si se logra mejorar los procesos de generación, gestión y disposición final de los residuos orgánicos, podría ser factible incrementar, fomentar u obtener beneficios tales como: a) Productos farmacéuticos, cosméticos, domésticos e industriales, así como alimentos y lechos para animales [5], b) Obtención de fuentes de energía eléctrica y térmica a partir de biocombustibles y biogás [8], c) Producción de composta y efluentes líquidos como fertilizantes en suelo que contribuyan a incrementar la calidad y/o cantidad de nutrientes, evitar la erosión y aumentar la retención de humedad [5, 8], y finalmente, d) Invertir en estrategias y alternativas innovadoras para el aprovechamiento y revalorización de residuos orgánicos con beneficios en distintas áreas. [5].

Este tipo de prácticas y actividades, fomentan e impulsan la revalorización de residuos orgánicos. En este sentido, cabe señalar que hoy en día, es importante crear mayor conciencia

ambiental e incorporar dichas estrategias de gestión de residuos orgánicos en nuestra sociedad.

3. ¿Qué se puede encontrar en los residuos orgánicos?

La cantidad de residuos orgánicos, principalmente frutas y verduras, como se ha mencionado en apartados anteriores es significativo. Los residuos orgánicos pueden provenir de fuentes domésticas cuando se ingieren las partes comestibles y se desecha la cascara y/o porciones de piel restantes; así mismo, pueden provenir de fuentes industriales en forma de orujo (pulpa, piel, semillas y tallo) después de la producción de alimentos y bebidas. En este aspecto, los residuos orgánicos pueden provenir desde de cualquier nivel de la cadena de suministro y producción de alimentos. Además, por parte del sector agrícola, una gran cantidad de residuos orgánicos pueden ser generados, entre los que se puede mencionar del tipo herbáceos (hojas y floretes), leñosos (ramas) y productos agrícolas dañados [9, 10].

En relación con lo anterior, en residuos de frutas y verduras se pueden encontrar diferentes compuestos bioactivos, de los cuales predominan los componentes fenólicos (fenoles, ácidos fenólicos y flavonoides), los cuales son compuestos con distintas propiedades interesantes tales como antioxidantes, antimicrobianos, anticancerígenos, entre otras. Por ello, este tipo de compuestos presentes en alimentos de origen vegetal, presentan muchos beneficios a la salud, por lo que es importante que formen parte de la dieta humana [10].

Por otro lado, los compuestos fenólicos presentes en residuos orgánicos de frutas y verduras pueden ser aprovechados mediante extractos obtenidos a partir de dichos residuos, para la obtención de nanopartículas metálicas (síntesis verde sustentable), mediante la reducción de sus sales metálicas aprovechando la capacidad antioxidante o reductora que poseen.

Para complementar lo anterior, a continuación, en la Tabla 1, se muestran algunos de los compuestos bioactivos presentes en diferentes tipos de residuos de frutas y verduras más conocidas.

4. Nanotecnología y nanopartículas metálicas

La nanotecnología es la ciencia que se encarga de manipular la materia a escala nanométrica (1×10^{-9}), específicamente átomos, compuestos y moléculas, con la finalidad de revolucionar y desarrollar diversos dispositivos y productos con aplicaciones en diferentes campos tales como la medicina, farmacéutica, ingeniería, optoelectrónica, informática, entre otras. En relación con el presente trabajo, este tipo de tecnología han despertado el interés de incorporar procesos bioquímicos y biológicos para dar lugar a campos relacionados más avanzados como en el caso de la nanobiotecnología aplicada en el área de agricultura sustentable, así como las ya mencionadas anteriormente. [11, 12]

Con lo anterior, conviene señalar la definición de nanopartícula como una partícula a escala nanométrica que solo puede ser visible mediante un microscopio electrónico. Una nanopartícula tiene una dimensión entre 1 y 100 nm, y por su naturaleza o composición, puede ser de varios tipos tales como: a) metálicas, b) a base de carbon, c) poliméricas, d) dendrímeros, f), nanocristales (puntos cuánticos), g) liposomas, entre otras [13].

Tabla 1. Compuestos bioactivos en residuos de frutas y vegetales.

Alimento	Residuo	Compuesto Bioactivo	Bioactividad	Referencia
Manzana	Pulpa y cáscara	Carbohidratos	Fibra dietética, prebiótico	[9, 14]
		Ácidos fenólicos	Antioxidante, antimicrobiano, antiinflamatorio, antitumoral, cardioprotector	
		Flavonoides		
		Antocianinas		
		Triterpenoides	Antimicrobiano, antiinflamatorio	
Cítricos	Cáscara	Carbohidratos	Fibra dietética, disminución de la presión arterial, control de glucosa en sangre, prebiótico, anticancerígeno, inmunomodulador	[9, 14, 15]
	Pulpa	Carotenoides	Inmunomoduladores antioxidantes	
			Flavonoides	Antibacteriano, antifúngico, antiinflamatorio, anticancerígeno
Uva	Pulpa	Isoflavonoides	Antioxidante, reductor de lípidos, inmunomodulador, anticanceroso	[15]
		Polifenoles		
Mango	Semilla	Ácidos fenólicos	Efecto antioxidante antitumoral, antibacteriano, antiviral, inmunomodulador	[9]
		Flavonoides		
		Catequinas		
		Xantanoideos		
	Carotenoides			
	Cáscara	Carotenoides	Antioxidante, prevención de enfermedad ocular	
Plátano	Cáscara	Ácidos fenólicos	Antioxidante, antibacteriana, antifúngica, control de glucosa y colesterol, antiangiogénica, neuroprotector.	[9]
		Flavonoles		
		Catequinas		
		Catecolaminas		
Tomate	Pulpa y cáscara	Licopeno	Antiproliferativo, antioxidantes, anticancerígeno, antiinflamatorias	[14, 15]
		Flavonoles		
Coco	Pulpa y cáscara	Triglicéridos	Antiinflamatorio, antioxidante, antifúngico, antimicrobiano, antitumoral, analgésico, cardioprotector, anticonvulsivo	[15]
		Fitoesteroles		
Bayas	Pulpa	Antocianinas	Prevención de arterosclerosis y cáncer	[9, 14]
	Ramas	Ácidos fenólicos	Propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas	
		Flavonoles		
		Antocianinas		
Semillas	Lípidos	Antioxidante, regeneración de la piel		
Papa	Pulpa y cáscara	Carbohidrato	Fibra dietética, hipocolesterolémica.	[9]
	Cáscara	Ácidos fenólicos	Antioxidante, antimicrobiano, antiinflamatorio	
		Glicoalcaloide	Anticancerígeno	
Zanahoria	Raíz	Carotenoides	Antioxidante, prevención de enfermedad ocular	[9, 15]
		Tocoferol		
		Carbohidrato	Fibra dietética, hipocolesterolémica.	
Brócoli y Coliflor	Tallos, hojas y floretes	Ácidos fenólicos	Antioxidante, antimicrobiano, antihipertensivo, anticancerígeno	[9, 15]
		Flavonoides		
		Glucosinolatos		
		Isotiocianato	Quimiopreventivo	

Ahora bien, el presente trabajo se enfoca en abordar información importante sobre las nanopartículas del tipo metálicas. Estos nanomateriales pueden estar formados principalmente por metales nobles u óxidos de metales, los cuales pueden presentar diversas propiedades debido a su relación área/volumen que favorece una mayor reactividad. En adición a lo anterior, durante la síntesis biológica de este tipo de nanopartículas, el tipo de metal u óxido que puede formar dichos nanomateriales depende del tipo de sal metálica utilizada, así como del agente reductor y estabilizante (proveniente de seres vivos como plantas o microorganismos), que pueda reducir los iones metálicos para la formación de su respectiva nanopartícula [11, 16].

5. Síntesis verde de nanopartículas metálicas

En los últimos años, las nanopartículas metálicas han adquirido gran importancia debido a sus propiedades y potenciales aplicaciones, lo cual ha despertado el interés de los investigadores por buscar nuevas metodologías de síntesis. Al respecto, se pueden obtener nanopartículas metálicas aplicando procesos biológicos, mediante el uso de seres vivos o sus partes como microorganismos y/o sus medios de cultivo, algas, levaduras, hongos, así como plantas y sus extractos. En este sentido, es importante mencionar que en la lucha por reducir y revalorizar residuos orgánicos principalmente de origen vegetal (hojas, tallo, flores, semillas, raíces, cáscaras de frutas y vegetales), estos pueden ser aprovechados para obtener agentes

reductores y estabilizantes para la síntesis de nanopartículas en este caso metálicas. Por lo tanto, este método es la ruta favorable cuando se requiere de reducir el volumen de residuos orgánicos generados debido a que las frutas y verduras desechadas pueden usarse como extracto para la síntesis de nanopartículas [16]. Al proceso biológico mencionado mediante el cual se elaboran nanopartículas se denomina síntesis verde [11, 17].

La síntesis verde de nanopartículas metálicas conlleva algunas ventajas importantes en comparación con los métodos de síntesis por métodos convencionales (químicos y físicos), tales una mejor relación costo/beneficio, procesos no tóxicos, no contaminantes y amigables con el medio ambiente [16].

Ahora bien. ¿Cómo se puede usar los residuos orgánicos para sintetizar nanopartículas metálicas? En el apartado “¿Qué se puede encontrar en los residuos orgánicos?” se mencionó sobre algunos componentes bioactivos presentes en frutas y verduras como los polifenoles. Estos compuestos actúan como agentes reductores y estabilizadores durante la síntesis de nanopartículas metálicas reduciendo los iones metálicos a su forma neutra (metálica), y dirigiendo el crecimiento de la partícula en una dirección o desempeñando funciones de protección para evitar la aglomeración de las nanopartículas [18]. En la figura 1, se muestra un esquema sobre el proceso de síntesis verde de nanopartículas, en el cual se aprovechan extractos de residuos orgánicos para su obtención.

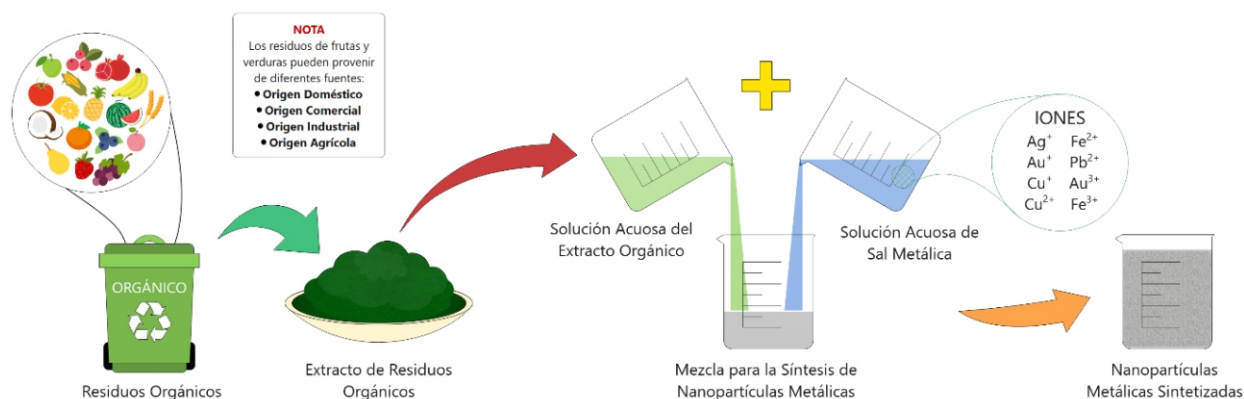


Figura 1. Representación esquemática de la síntesis verde de nanopartículas metálicas a partir de residuos orgánicos (frutas y verduras). Adaptado de [19]

6. Aplicaciones de nanopartículas metálicas

Como se ha mencionado anteriormente, las nanopartículas metálicas resultan atractivas e interesantes para investigadores de todo el mundo, debido a su amplio campo de aplicación y a las diversas propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, químicas y físicas que pueden presentar. Por lo tanto, surge la siguiente pregunta sobre en donde pueden usarse estos nanomateriales [20].

Continuando con lo anterior, las nanopartículas metálicas ofrecen múltiples aplicaciones entre las cuales se encuentran: a) recubrimientos médicos, b) textiles clínicos, c) catalizadores, d) aditivos, e) fabricación de dispositivos electrónicos y ópticos, f)

biosensores, g) agentes antiincrustantes h) agentes antimicrobianos, i) agentes anticancerígenos y antidiabéticos, h) agentes antioxidantes, entre otros. [20, 21].

En relación con lo anterior, se ha mostrado un fuerte interés por la capacidad antimicrobiana, antifúngica, antioxidante y citotóxica que presentan algunas nanopartículas metálicas (p. ej. Ag, Cu, Au, Fe_3O_4 , ZnO), las cuales pueden ser sintetizadas a partir de distintos residuos de frutas y verduras [21-25].

A continuación, en la Tabla 2, se muestra estudios sobre la síntesis de nanopartículas metálicas a partir de extractos de diferentes residuos orgánicos y sus aplicaciones.

Tabla 2. Ejemplos de nanopartículas metálicas sintetizadas a partir de residuos orgánicos.

Alimento	Residuo	NP	Aplicaciones	Referencias
Naranja	Cáscara	Ag ZnO Fe ₃ O ₄	Actividad antibacteriana, antifúngica, citotoxicidad contra células de cáncer de mama, fotocatalítica contra azul de metileno, eliminación de metales tóxicos en aguas residuales	[11, 17, 18, 19, 25]
Granada	Cáscara	Ag Cu	Actividad antibacteriana, antifúngica, citotoxicidad contra células de cáncer de mama y de colon	[11, 18]
Plátano	Cáscara	Ag Pd Fe ₃ O ₄	Actividad antibacteriana, antifúngica, citotoxicidad contra células de cáncer de mama, catalizador, sensores, eliminación de metales tóxicos en aguas residuales	[11, 18, 21, 25]
Manzana	Cáscara	Ag	Actividad antibacteriana, antifúngica, citotoxicidad contra células de cáncer de mama	[11, 18]
Limón	Cáscara	Ag ZnO	Actividad antibacteriana, antifúngica, fotocatalítico contra azul de metileno	[11]
Tomate	Cáscara	ZnO	Fotocatalítico contra azul de metileno	[11]
Pomelo	Cáscara y pulpa	Ag Au ZnO	Fotocatalítico contra azul de metileno, semiconductores, espectroscopia, imágenes de tejidos, terapia contra el cáncer.	[11, 18, 19]
Patata	Cáscara	Ag ZnO	Actividad antibacteriana, antidiabético, citotoxicidad contra las células cancerosas HepG2, fotocatalítica contra azul de metileno y colorantes azoicos.	[11]
Sandía	Cáscara	Ag Au Pd	Aplicación en el campo biomédico, farmacéutico, cosmético, alimentario y como catalizador	[18, 19]
Uva	Entera, piel, tallo, semillas y hojas	Ag Au Fe	Actividad antibacteriana, aplicaciones médicas, imágenes moleculares y terapia contra el cáncer, colorante azoico	[18, 19, 25]
Piña	Cáscara y pulpa	Ag ZnO	Actividad antioxidante, antibacteriana, tratamiento de enfermedades graves como la diabetes y el cáncer	[18, 19]
Zanahoria	Raíz	Ag Au	Aplicaciones médicas	[19]
Alfalfa	Planta	FeO Fe ₂ O ₃ Fe ₃ O ₄	Fundamental en múltiples aplicaciones de la nanotecnología	[25]
Papaya	Cáscara, pulpa y hoja	Ag Fe ₂ O ₃	Actividad antibacteriana, antioxidante, eficaces contra las enzimas hepáticas, cicatrización de heridas, fotocatalítica contra amarillo remazol RR	[11, 19, 26]

7. Conclusiones

La síntesis verde de nanopartículas metálicas a partir de frutas y verduras es una alternativa viable para revalorizar los residuos orgánicos que se generan en gran cantidad diariamente en México y en el mundo, teniendo así una estrategia adecuada para mitigar y enfrentar los impactos negativos ambientales (producción de gases de efecto invernadero, líquidos lixiviados, contaminación de suelos y aguas) que son favorecidos por una excesiva producción, acumulación y mala disposición de residuos orgánicos.

Dentro de los diversos componentes presentes en residuos orgánicos provenientes de frutas y verduras, se encuentran los compuestos fenólicos antioxidantes, principales responsables de la síntesis (reducción y estabilización) de nanopartículas metálicas con distintas propiedades útiles en áreas como la medicina, medio ambiente, materiales, etcétera, y de las cuales se ha reportado la síntesis de nanopartículas principalmente de Au,

Cu, Fe, ZnO, Fe₃O₄, Ag, siendo estas últimas de las más producidas a partir de residuos orgánicos, aprovechando sus propiedades antibacterianas, antifúngicas, antioxidantes y citotoxicidad contra diferentes tipos de cáncer, lo cual puede representar beneficios al sector médico y farmacéutico.

Por lo tanto, es importante profundizar y continuar con líneas de investigación relacionadas con la temática descrita en el presente trabajo de revisión, ya que representa alternativas adecuadas para abordar la problemática sobre la generación y manejo de residuos orgánicos, que su vez contribuye en la obtención de nanomateriales con interesantes aplicaciones en áreas importantes de estudio, y considerando además que su producción por síntesis verde mediante residuos orgánicos, es una metodología no contaminante, factible y de bajo costo al revalorizar dichos residuos.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo de programa Paicyt 2020 y 2021, a la Facultad de Ciencias Químicas y a CONACYT por el apoyo a JEC-A y B-UC con beca del programa Becas Nacionales de Posgrado.

9. Referencias

- N.U. Objetivos del desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> (accesado el 13 de octubre de 2021).
- UN Environment Programme. <https://www.unep.org/thinkatsave/get-informed/worldwide-food-waste> (accesado el 1 de septiembre de 2021)
- González G, C. G. Frutas y verduras perdidas y desperdiciadas, una oportunidad para mejorar el consumo. *Rev. Chil. Nutr.* 2018, 45 (3), 198-198.
- Blakeney, M. Food Loss and Food Waste: Causes and Solutions; 2019. <https://doi.org/10.4337/9781788975391>.
- SEMARNAT. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros/2011/CD003593.pdf> (accesado el 18 de noviembre del 2021).
- Venkat, K. The climate change and economic impacts of food waste in the United States. *Int. J. Food Syst. Dyn.* 2012, 2 (4), 431–446. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v2i4.247>.
- Vilariño, M. V.; Franco, C.; Quarrington, C. Food Loss and Waste Reduction as an Integral Part of a Circular Economy. *Front. Environ. Sci.* 2017, 5 (MAY). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00021>.
- CEC. Characterization and Management of Organic Waste in North America—Foundational Report. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation. 2017, 260 pp.
- Ben-Othman, S.; Jöudu, I.; Bhat, R. Bioactives from Agri-Food Wastes: Present Insights and Future Challenges; 2020; Vol. 25. <https://doi.org/10.3390/molecules25030510>.
- Rafiq, S.; Kaul, R.; Sofi, S. A.; Bashir, N.; Nazir, F.; Ahmad Nayik, G. Citrus Peel as a Source of Functional Ingredient: A Review. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 2018, 17 (4), 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.006>.
- Kumar, H.; Bhardwaj, K.; Dhanjal, D. S.; Nepovimova, E.; Şen, F.; Regassa, H.; Singh, R.; Verma, R.; Kumar, V.; Kumar, D.; Bhatia, S. K.; Kuča, K. Fruit Extract Mediated Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: A New Avenue in Pomology Applications. *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21 (22), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijms21228458>.
- Zhao, L.; Lu, L.; Wang, A.; Zhang, H.; Huang, M.; Wu, H.; Xing, B.; Wang, Z.; Ji, R. Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *J. Agric. Food Chem.* 2020, 68(7), 1935-1947.
- Bhatia, S. Nanoparticles types, classification, characterization, fabrication methods and drug delivery applications. In *Natural polymer drug delivery systems*. Springer, Cham, 2016, (pp. 33-93).
- Yalcin, H.; Çapar, T. D. Chapter 21 Bioactive Compounds of Fruits and Vegetables. *Minim. Process. Refrig. Fruits Veg.* 2017, 723–745. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6>.
- Soumya, N. P. P.; Mini, S.; Sivan, S. K.; Mondal, S. Bioactive Compounds in Functional Food and Their Role as Therapeutics. *Bioact. Compd. Heal. Dis.* 2021, 4 (3), 24–39. <https://doi.org/10.31989/bchd.v4i3.786>.
- Rafique, M.; Sadaf, I.; Rafique, M. S.; Tahir, M. B. A Review on Green Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Applications. *Artif. Cells, Nanomedicine Biotechnol.* 2017, 45 (7), 1272–1291. <https://doi.org/10.1080/21691401.2016.1241792>.
- Ahmad, S.; Munir, S.; Zeb, N.; Ullah, A.; Khan, B.; Ali, J.; Bilal, M.; Omer, M.; Alamzeb, M.; Salman, S. M., & Ali, S. Green nanotechnology: a review on green synthesis of silver nanoparticles - an ecofriendly approach. *Int. J. Nanomedicine*; 2019; 14, 5087–5107. <https://doi.org/10.2147/IJN.S200254>
- Kumar, H.; Bhardwaj, K.; Sharma, R.; Nepovimova, E.; Kuca, K.; Singh Dhanjal, D.; Verma, R.; Bhardwaj, P.; Sharma, S.; Kumar, D. Fruit and Vegetable Peels: Utilization of High Value. *Molecules* 2020, 25, 1–21.
- Ghosh, P. R.; Fawcett, D.; Sharma, S. B.; Poinern, G. E. J. Production of High-Value Nanoparticles via Biogenic Processes Using Aquacultural and Horticultural Food Waste. *Materials (Basel)*. 2017, 10 (8). <https://doi.org/10.3390/ma10080852>.
- López, G.; Morales, R.; Olea, O.; Sánchez, V.; Trujillo, J.; Valera, V.; Vilchis, A. Nanoestructuras metálicas; síntesis, caracterización y aplicaciones. Libro de Editorial Reverte, Universidad Autónoma del Estado de México, 2013, 207 pags
- Zangeneh, ;, M.; Bovandi, S.; Gharehyakkeh, S.; Zangeneh, A.; Irani, P. Green synthesis and chemical characterization of silver nanoparticles obtained using Allium saralicum aqueous extract and survey of in vitro antioxidant, cytotoxic, antibacterial and antifungal properties. *Appl. Organomet. Chem.* 2019, 33(7), e4961.
- Tahvilian, R.; Zangeneh, M. M.; Falahi, H.; Sadrjavadi, K.; Jalalvand, A. R.; Zangeneh, A. Green synthesis and chemical characterization of copper nanoparticles using Allium saralicum leaves and assessment of their cytotoxicity, antioxidant, antimicrobial, and cutaneous wound healing properties. *Appl. Organomet. Chem.* 2019, 33(12), e5234.
- Velammal, S. P.; Devi, T. A.; Amaladhas, T. P. Antioxidant, antimicrobial and cytotoxic activities of silver and gold nanoparticles synthesized using Plumbago zeylanica bark. *J Nanostructure Chem.* 2016, 6(3), 247-260.
- Iqbal, J.; Abbasi, B. A.; Mahmood, T.; Kanwal, S.; Ahmad, R.; Ashraf, M. Plant-extract mediated green approach for the synthesis of ZnONPs: Characterization and evaluation of cytotoxic, antimicrobial and antioxidant potentials. *J. Mol. Struct.* 2019, 1189, 315-327.
- Saif, S.; Tahir, A.; Chen, Y. Green Synthesis of Iron Nanoparticles and Their Environmental Applications and Implications. *Nanomaterials* 2016, 6 (11), 1–26. <https://doi.org/10.3390/nano6110209>.
- Bhuiyan, M. S. H.; Miah, M. Y.; Paul, S. C.; Aka, T. Das; Saha, O.; Rahaman, M. M.; Sharif, M. J. I.; Habiba, O.; Ashaduzzaman, M. Green Synthesis of Iron Oxide Nanoparticle Using Carica Papaya Leaf Extract: Application for Photocatalytic Degradation of Remazol Yellow RR Dye and Antibacterial Activity. *Heliyon* 2020, 6 (8), e04603. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04603>.