

Nanotecnología y su aplicación en alimentos

Nanotechnology and its applications in food

Ojeda, Gonzalo Adrián,¹ Arias Gorman, Adriana María,¹
Sgroppo, Sonia Cecilia^{1,*}

ABSTRACT: Nanotechnology presents an incredible potential for application in the food sector along the food chain prioritizing consumer requirements. It has the capacity to provide new forms of control and structured food with greater functionality and value. This paper briefly explains the main concepts of nanotechnology and the importance of reducing size in their properties. The main nano-objects of potential use in foods are described and a global view of different studies carried out and their applications in the food industry is offered.

KEYWORDS: nanomaterials, nanocomposites, nanoemulsions, packaging, ingredients.

RESUMEN: La nanotecnología presenta un increíble potencial de aplicación en el sector alimentario a lo largo de la cadena alimentaria priorizando los requerimientos del consumidor. Tiene la capacidad de proveer nuevas formas de control y estructurado de alimentos con mayor funcionalidad y valor. En este trabajo se explican brevemente los principales conceptos de la nanotecnología y la relevancia que tiene la reducción de tamaño en sus propiedades. Se describen los principales nanobjetos de uso potencial en alimentos y se ofrece una visión global de diferentes estudios llevados a cabo y sus aplicaciones en la industria alimentaria.

PALABRAS CLAVE: nanomateriales, nanocompuestos, nanoemulsiones, envases, ingredientes.

Introducción

La ciencia y la tecnología a escala nanométrica prometen estar entre los campos de mayor innovación durante largo tiempo. La nanotecnología permite controlar y modificar la materia y los sistemas a escala nanométrica con el objetivo de modificar significativamente sus características respecto de las observadas a escala macroscópica.

Las dimensiones a nanoescala se definen en rango de 1 a 100 nm aproximadamente (Organización Internacional de Estandarización, ISO, 2015), siendo el tamaño el parámetro clave para identificar un nanomaterial (NMs). El prefijo “nano” es de origen griego y significa diminuto, enano, pequeño y se utiliza en el sistema internacional de unidades para indicar un factor de 10^{-9} ($1\text{nm} = 1.10^{-9}\text{m}$).

La Comisión Europea recomienda considerar un nanomaterial como aquel material natural, incidental o manufacturado que tiene 50% o más de

Recibido: 28 de septiembre de 2018.

Aceptado: 10 de diciembre de 2018.

* Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. Av. Libertad 5450. 3400. Corrientes, Argentina.

¹ Autora de correspondencia: sonia.sgroppo@unne.edu.ar | sonia.sgroppo@hotmail.com



partículas con tamaño en el orden de 1 a 100 nm (EFSA, 2018). ISO los define como un material que tiene alguna dimensión externa a escala nano (nanobjeto) o que tiene una estructura interna o superficial en nanoescala (material nanoestructurado) (ISO, 2015). Por este motivo, los NMs difieren en sus propiedades físicas, químicas o biológicas de las sustancias a escala normal. Estos cambios se deben a su tamaño pequeño combinado con la energía superficial, dada la cantidad de átomos en la superficie externa del material y la cantidad reducida en el interior. Por otra parte, los electrones del material se distribuyen en distintos niveles energéticos generando una estructura electrónica diferente a la original, apareciendo fenómenos cuánticos que modifican las propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas del sistema.

Las nanopartículas (NPs) son nanobjetos con todas las dimensiones externas a nanoescala, en los cuales la longitud de los ejes mayores y menores no difieren significativamente entre sí. Son capaces de autoensamblarse y tienen diferente reactividad, dureza, conductividad, solubilidad, velocidad de absorción y biodisponibilidad respecto de las partículas macro. Estas características de las NPs, dan origen a nuevos ingredientes y otras formas de elaborar alimentos con estructuras y propiedades diferenciales que incrementan o mejoran sus funcionalidades, adquiriendo mayor valor comercial.

La nanotecnología ofrece importantes oportunidades para el desarrollo de productos innovadores y de aplicación en producción, procesamiento, preservación y envasado de alimentos. La disponibilidad de productos alimenticios derivados de la nanotecnología ha aumentado notoriamente. Según la FAO (2013), las patentes con palabras clave “nano” y “food” publicadas de 2009 a 2011 fueron 183, de las cuales 47 correspondían a envases o recubrimientos, 19 a nanoaditivos y 10 a métodos de detección incorporando nanotecnología. Además, para los países en desarrollo, la nanotecnología es particularmente interesante debido a que es una actividad productiva y económica, y con bajos requerimientos para su implementación (disponibilidad de tierras, mantenimiento, energía y materiales). Aguilera (2009) propuso considerar que en la industria alimentaria actual y del futuro existen dos dimensiones o ejes fundamentales relacionados entre sí:

- a. El eje de la “cadena alimentaria”, que se inicia con la producción de la materia prima y finaliza con el envasado y la distribución del producto.
- b. El eje del “consumidor”, a quien debe considerarse integralmente.

Actualmente, al consumidor no solo le interesa el aporte y biodisponibilidad de los nutrientes, sino también el efecto positivo que se logra al consumir un alimento (saciedad, control de peso, sensaciones agradables por la ingesta, salud, etc.). Estas exigencias son resultado de los cambios ocurridos en los últimos años en la sociedad, donde los consumidores tienen un mayor acceso a la información y buscan permanentemente una mejor calidad de vida.

Los NMs utilizados en alimentos se clasifican en 3 grupos diferentes (RIKILT y JRC, 2014) (tabla 1):

- a. NMs orgánicos: lípidos, proteínas y polisacáridos, utilizados para encapsular vitaminas, antioxidantes, colorantes, saborizantes y preservadores, formando micelas, liposomas o nanoesferas, etc. Tienen la ventaja de permitir mayor ingestión, absorción, biodisponibilidad y estabilidad en el organismo.
- b. NMs combinados orgánico/inorgánico: son llamados NMs funcionalizados de superficie, son agregados a una matriz por funcionalidad específica (antimicrobianos, antioxidantes, reguladores de permeabilidad y rigidez).
- c. NMs inorgánicos: son metales y óxido de metales, NPs de Ag, Fe, Se, TiO₂, utilizados como aditivos, suplementos alimentarios o en el envasado.

Los nanocompuestos se forman al incorporar las NPs en bajo porcentaje (< 5%) a una matriz polimérica, la cual resulta reforzada por estos rellenos a nanoescala que presentan mayor rigidez y resistencia. Además, la incorporación de las NPs provoca recorridos tortuosos de los gases a través del nanocompuesto, regulando el intercambio gaseoso entre el material de envasado y el ambiente. Los principales polímeros utilizados pueden ser de origen natural o sintético, quitosano, celulosa, carragenano, polivinil alcohol, ácido poliláctico, ácido poliglicólico, polietileno, poliamida, PVC, entre otros. Como rellenos, se utilizan NPs inorgánicas u orgánicas, arcillas, silicatos, Cu, Ti, celulosa, carbono, etc., con formas geométricas diversas (esfera, copo, nanotubo, fibra, por mencionar algunas.). Estos rellenos pueden ser incorporados a la matriz, principalmente en forma intercalada o exfoliada (Cushen *et al.*, 2012) y utilizando métodos de extrusión o recubrimiento. Durante el proceso de adición de los materiales se debe controlar la cantidad y dispersión de las NPs, su interacción con la matriz y las agregaciones que pueden ocurrir.

Las nanoemulsiones son dispersiones de dos líquidos inmiscibles, aceite y agua, estabilizadas por moléculas surfactantes que forman una capa interfa-

TABLA 1. Clasificación de los NMs en alimentos.

Nanomateriales para aplicaciones en alimentos y contacto con alimentos						
Orgánicos		Combinado orgánico/ inorgánico		Inorgánicos		
Micelas y sistemas de liberación	Polímeros, compuestos y emulsiones	Superficies modificadas con arcilla	Superficies modificadas con metal o metaloide	Arcilla	Metal y metaloide	Fulereno y nanotubo de carbono (CNT)

Fuente: Elaboración de los autores, adaptado de RIKILT y JRC (2014).

sial. El tamaño de gota promedio está en el rango de 20 a 200 nm, siendo aptas para alimentos transparentes si el tamaño es inferior a 40 nm. Tienen gran área superficial y liberarían lentamente los bioactivos, evitándose la sedimentación o precipitación de la crema debido al movimiento browniano. Además, serían mejoradores de la textura, el sabor y color de los alimentos y actuarían como sistemas apropiados para liberar compuestos poco solubles en agua al aumentar la dispersión y la estabilidad de las gotas (McClements, 2012). La composición y estructura de las nanoemulsiones pueden ser diseñadas apropiadamente para proteger al compuesto y lograr el comportamiento esperado en el organismo. Asimismo, la capacidad de formar geles de las nanoemulsiones permitiría el diseño de alimentos con diferentes texturas.

Las nanoemulsiones de aceite/agua se pueden utilizar para encapsular los compuestos hidrofóbicos (vitaminas, minerales, componentes sapidoaromáticos, antioxidantes, carotenoides), mientras las de agua/aceite/agua para el nanoencapsulado de bioactivos hidrosolubles incorporadas al corazón acuoso. La biodisponibilidad de los compuestos incluidos en las gotitas es inversamente proporcional al tamaño de la gota, debido probablemente a mayor actividad enzimática y mayor tiempo de contacto con la mucosa, al transporte directo a través del epitelio y el aumento de la solubilidad en agua de los componentes hidrofóbicos.

Para ser utilizadas industrialmente, las nanoemulsiones deben ser formuladas con ingredientes *generally recognized as safe* (GRAS)² y permitir el escalado a producción industrial, tanto desde el punto de vista operativo como económico. Asimismo, dado que las nanogotas pueden incrementar su biodisponibilidad deben realizarse evaluaciones *in vivo*.

Asimismo, la nanoencapsulación aumentaría potencialmente la solubilidad, estabilidad y biodisponibilidad de los alimentos, previniendo interacciones indeseables entre componentes. Los nanoliposomas y los nanoquelatos son los principales transportadores para los bioactivos y facilitan el control y liberación específica de nutrientes, nutracéuticos, enzimas, vitaminas, antimicrobianos y aditivos. Los nanoquelatos estabilizan los micronutrientes y aumentan el valor nutricional de los alimentos procesados (Pathakoti *et al.*, 2017).

Mejoramiento e innovación en alimentos

La nanotecnología puede ser utilizada para preparar alimentos innovadores e incorporar nuevos ingredientes y aditivos con funcionalidad determinada ya sea como antimicrobianos, antioxidantes, mejoradores de textura y enmascaradores de sabor. Además, se puede pensar en aplicarla al diseño de un alimen-

² Generalmente reconocido como seguro (GRAS) es una designación de la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) de que un químico o sustancia agregada a los alimentos es considerada segura por los expertos, por lo que está exenta de la Ley Federal de Alimentos, Medicamentos y Cosméticos (FFDCA, por sus siglas en inglés) requisitos de tolerancia a los aditivos alimentarios.

to con perfil nutricional específico que responda a las necesidades del individuo según sus requerimientos nutrimentales y de salud (alergias, enfermedades crónicas) o preferencias, o bien en la elaboración de alimentos interactivos que liberen colores y sabores de acuerdo con la demanda del consumidor.

Actualmente se comercializan suplementos dietéticos destinados a la alimentación, el deporte y al mercado de alimentos saludables conteniendo NPs minerales en su formulación (SiO_2 , Mg, Ca, etc.). En Australia se ofrecen nanocápsulas con aceite omega-3 que se liberan solo en el estómago evitando así los sabores desagradables. En Argentina se produce Lipomize: liposomas formulados con fosfolípidos de lecitina, estables estructuralmente y con resistencia a la digestión gástrica y nanoencapsulados de Fe y omega-3, que tendrían una mayor absorción del mineral evitando las molestias intestinales por su ingesta (<https://www.fan.org.ar/potfolios/nutranova-la-linea-de-suplementos-dietarios-de-lipomize>). Unilever desarrolló helados, mayonesa y cremas untables bajas en grasa y calorías con textura y gusto cremoso, en tanto Nestlé elaboró nanoemulsiones de descongelado rápido. Por su parte, Aquanova formuló micelas que aumentan la estabilidad, efectividad y biodisponibilidad de ingredientes (vitaminas C y E y ácidos grasos). NovaSolare ofrece compuestos bioactivos (DL-alfa-tocoferol; coenzima Q10, ácidos grasos omega-3 y vitaminas A, D, D3, E, y K) y colorantes naturales (apocarotenal, β -caroteno, cúrcuma, clorofila, luteína) nanoencapsulados. También Nutralease está ofreciendo compuestos bioactivos (luteína, licopeno, vitaminas A, D3, E, Q₁₀, fitoesteroles e isoflavonas) con mayor biodisponibilidad para su uso en varios alimentos y bebidas, o nanoemulsiones protectoras de los componentes del sabor (Maurya, 2018).

Paralelamente, hay publicados numerosos artículos científicos relacionados con la temática, la cual continúa bajo estudio en razón de su potencialidad. Ha *et al.* (2015) demostraron que al preparar una nanoemulsión de licopeno adicionada al extracto de tomate, la bioaccesibilidad *in vitro* del bioactivo se incrementó, siendo estable en medio acuoso y teniendo escasa oxidabilidad. Ban *et al.* (2015) obtuvieron resultados similares en la bioaccesibilidad oral para flavonoides nanoemulsionados en aceite/agua. Por otra parte, Akbas *et al.* (2018) prepararon nanoemulsiones de capsaicina transparentes con color rojo brillante y actividad inhibitoria ante *S. aureus* y *E. coli*, aplicable a alimentos funcionales, recubrimientos comestibles o envases. Mientras, Lane *et al.* (2016) desarrollaron nanoemulsiones de aceite de lino omega-3 y algas en agua que permitirían el fortificado de alimentos. Silva *et al.* (2018) prepararon una doble emulsión estable, mezcla de aceite de oliva, lino y pescado adicionados de quercetina y ácido gálico en las fases acuosas internas y externas como sustituto de grasas en las formulaciones alimenticias.

Por otra parte, se obtuvo un producto sensorialmente aceptable al agregar a paté de pollo un nanoencapsulado de quercetina preparado con mezcla de aceite de soja y agua, evitando la oxidación lipídica del producto (De Carli *et al.*, 2018). En el caso de truchas arco iris almacenadas, se tuvieron resultados

similares al tratarlas con una nanoemulsión de aceite de girasol/agua y aceite esencial de *Z. multiflora* Boiss (Shadman *et al.*, 2018). Por su parte, Gani y Benjakul (2018) observaron que el agregado de una nanoemulsión de aceite de coco/caseinato de sodio al gel de surimi le dio mejor textura y apariencia al gel además de aumentar su blancura.

Para bebidas isotónicas, Bovi *et al.* (2017) desarrollaron nanoemulsiones de aceite de buriti (*Mauritia flexuosa* L.), producto con alto contenido en carotenoides, obteniendo un colorante natural estable para dichas bebidas. Wang *et al.* (2016) prepararon una bebida funcional deshidratada incorporando sales, vitaminas lipofílicas e hidrofílicas, a través de un proceso de nanoemulsificación con aceite de menta y caseinato de sodio nanoencapsulado con pectinas. En tanto, Ghosh *et al.* (2014) obtuvieron una nanoemulsión de eugenol con aceite de sésamo/Tween 80-20/agua que prolongó la vida útil del jugo de naranja, inhibiendo el desarrollo de *S. aureus* y controlando la flora nativa durante el almacenamiento a 4 °C.

Envasado de alimentos

El principal objetivo del envasado, es asegurar la protección y preservación de la calidad del alimento desde el momento de su producción hasta llegar a manos del consumidor. Un envase es un elemento contenedor, facilitador del transporte y la manipulación. Asimismo, un envase correctamente diseñado debe ser atractivo y de fácil uso para el consumidor, facilitar el mercadeo (*marketing*) del producto y proveer de información acerca del mismo.

Actualmente, la incorporación de nanodispositivos al envasado busca mejorar sus funciones, utilizándose los nanocompuestos como material de envases o recubrimientos. De esta forma, se puede controlar el intercambio de gases, temperatura, humedad, flexibilidad, resistencia mecánica y térmica. En general, los nanocompuestos no producen cambios de densidad o fluidez de la película, ni modificaciones en su transparencia y tienen la ventaja de ser reciclables, permitiendo reducir la contaminación ambiental. Admiten la incorporación de compuestos antimicrobianos, antioxidantes, absorbedores de O₂ y vapor de agua, además de detectar y dar información relevante acerca del alimento (frescura, temperaturas de abuso, entre otros).

Las capas de montmorillonita (Mx(A₁₄-xMgx) Si₈O₂₀(OH)₄), actualmente el relleno de arcillas más utilizado, incrementan las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de los compuestos poliméricos mejorando las propiedades de barrera a los gases. Varias empresas desarrollaron nanocompuestos con base en matrices poliméricas de nylon adicionado de montmorillonita y las ofrecen como pellets, Durethan RKU2-2601, (Nanocor TM) (Duran y Marcato, 2013), para el envasado de bebidas alcohólicas saborizadas (Honeywell Internacional) o en botellas PET con multicapas de nanocompuesto para cervezas y bebidas carbonatadas (Bumbudsanpharoke y Ko, 2015).

Picouet *et al.* (2014) estudiaron el agregado de nanoarcillas a una matriz de poliamida 6 (PA6) para envasar lomos de vacuno al vacío, verificando incrementos de rigidez en el envase y las propiedades de barrera ante el O₂ y luz UV. Mientras, Balooch *et al.* (2018), ensayaron la preparación de nanocompuestos antifúngicos de montmorillonita con extractos de residuos de piel de granada (*Punica granatum*) por intercalación simple y comprobaron su efectividad *in vitro* e *in vivo* ante *Botrytis cinerea* en manzanas.

Por otra parte, las NPs de metal/óxido de metal también pueden actuar efectivamente como antimicrobianos, debido a la generación de especies reactivas al oxígeno que pueden dañar las células, alterar su estructura o función al interactuar con los iones metálicos. Se debe tener presente que uno de los aspectos más críticos en la cadena alimentaria es el deterioro de origen microbiológico.

Las NPs y nanocompuestos de Ag son muy utilizadas en la industria por sus propiedades antimicrobianas en el envasado de frutihortícolas, hierbas, pan, queso, sopas, carnes y se ofrecen bajo la denominación Fresher Longer™, Bags Fresher Longer™ (USA). También se incorporan a bandejas para alimentos y comercializan como Nano Silver Food Container (Corea del Sur), Zeomic (Japón), Nano Silver Food (China) (Bumbudsanpharoke y Ko, 2015). Hasta el momento, algunos estudios demuestran la nula o incipiente migración de los nanocompuestos desde el envase en contacto con alimentos o en sistemas modelo (Ntim *et al.*, 2015; Metak *et al.*, 2015).

Al envasar carnes, quesos, lechuga, manzanas, huevos con etilvinilalcohol (EVOH) y NPs_{Ag}, Martínez-Abad *et al.* (2012) encontraron reducciones de *Salmonella* y *L. monocytogenes*. Por otra parte, cuando Lloret *et al.* (2012) colocaron un *pad* adsorbedor de celulosa-AgNPs en el envase de muestras de carnes, kiwi y melón cortados, determinaron que la actividad antimicrobiana era dependiente de la matriz alimentaria. También se prepararon NPs de montmorillonita-Ag remplazando los iones Na⁺ de la arcilla y aplicaron a ensalada de frutas, resultando un producto de buena calidad sensorial y mayor vida útil por inhibición de los microorganismos alterantes (Costa *et al.*, 2011). Asimismo, se desarrollaron películas con mezclas binarias de agar y polvo de banana reforzados con NPs_{Ag}, verificándose efectos fuertes ante patógenos y bacterias Gram (-) (Orsuwan *et al.*, 2016). Otros *films* con base en agar y NPs Ag-Cu mostraron fuerte actividad inhibitoria frente a *L. monocytogenes* y *S. typhimurium* pudiendo utilizarse como material de envase (Arfat *et al.*, 2017).

Para preservar manzanas frescas cortadas, Li *et al.* (2011) prepararon bolsas de PVC conteniendo NPs de ZnO (200-400 nm) y determinaron su efectividad en el control del deterioro del producto, con reducción de la actividad respiratoria y el pardeamiento. Resultados similares encontraron Luo *et al.* (2015) en batatas frescas cortadas envasadas con nano-CaCO₃-LDPE, evidenciado en la disminución del índice de pardeamiento debido a menor actividad de las enzimas oxidativas. Al incorporar NPs de ZnO a *films* biode-

gradables de ácido poliláctico, Marra *et al.* (2016) encontraron mejoras mecánicas en el *film* y menor permeabilidad a los gases, en tanto Zhang *et al.* (2017) establecieron su efectividad ante *E. coli* y *S. aureus*. Otros autores incorporaron NPs de CuO (1%) a *films* de LDPE y lo aplicaron al ultrafiltrado de quesos, verificándose el control de coliformes durante el almacenamiento (Beigmohammadi *et al.*, 2016). También las NPs de ácido benzoico y vainillínico en biopolímeros de ácido poliláctico, glicólico-co-poliláctico y polietileno glicol fueron inhibitoras del crecimiento de *S. typhimurium*, *E. coli* O157:H7, *L. monocytogenes* en pollos crudos y cocidos (Ravichandran *et al.*, 2011).

El TiO₂ tiene propiedades antibacterianas potenciadas por acción de la luz y se utiliza para aumentar el blanqueo y el brillo en pastas dentales, caramelos, mayonesa, y evitar la aglomeración del producto. Al incorporar NPs TiO₂ al polietileno Xing *et al.* (2012) observaron acción inhibitoria frente a *S. aureus* y *E. coli*, que fue incrementada luego de la irradiación con luz UV. En tanto, Cozmuta *et al.* (2015) prepararon un nanocompuesto con Ag-TiO₂ y polietileno para el envasado del pan fresco, logrando prolongar la vida útil del producto.

Por otra parte, Dias *et al.* (2013) al aplicar *films* con nanotubos de carbono (CNT)-isotiocianato de alilo a pollo picado, verificaron su capacidad antimicrobiana y antioxidante. Un resultado similar observaron Zimoch-Korzycka y Jarmoluck (2015) y Dehnad *et al.* (2014) al utilizar recubrimientos de quitosano en carnes o formar un nanocompuesto con celulosa. Al aplicar quitosano junto a nanocristales de celulosa a peras (*Pyrus communis* L.) enteras se detectó retardo en la maduración y la aparición de los síntomas del deterioro post-cosecha (Deng *et al.*, 2017). Por otra parte, Kim *et al.* (2014) aplicaron recubrimientos de cera de carnauba/aceite de *lemongrass* nanoemulsionado en uvas (*Vitis labruscana* Bailey) y observaron inhibición de patógenos, además de evitar pérdida de la calidad. Del mismo modo, en frutillas frescas recubiertas con alginato y liposomas de limoneno se logró prolongar el periodo de vida post-cosecha (Dhital *et al.*, 2018)

También se hicieron ensayos de recubrimientos de pectinas/nanoemulsión de cúrcuma/aceite de canela para rodajas de pollo, que fueron efectivos en el control microbiológico y la lentificación de la degradación (Abdou *et al.*, 2018). En quesos bajos en grasa recubiertos con una nanoemulsión preparada con alginato de sodio-fibra de mandarina y aceite de orégano, Artiga-Artigas *et al.* (2017) determinaron su efectividad ante *S. aureus* y la flora nativa y la retención de la apariencia. Mientras que en carnes, Amna *et al.* (2015) observaron que material de envasado conteniendo nanofibras de ZnO-aceite de oliva fueron efectivos ante *S. aureus* y *S. typhimurium*, y, Khan *et al.* (2014) hicieron lo propio en los CNT conteniendo nisina ante *L. monocytogenes*.

Nanosensores

Un nanosensor es un sensor, que puede ser un electrodo o una capa activa estructurados a escala nanométrica y un procesador electrónico de datos, ca-

paz de convertir la señal detectada (luz, presencia de gas o sustancia orgánica) en señal electrónica. Tiene la ventaja ser un método no destructivo, de alta sensibilidad, rápida respuesta y recuperación. Los nanosensores pueden aplicarse como indicadores, etiquetas o recubrimientos para adicionar una función inteligente al envase a fin de detectar cambios en el pH, composición gaseosa, liberación de componentes debido al deterioro, falta de integridad del envase, indicadores de variación de temperatura, tiempo o de seguridad microbiana. Además, pueden integrarse a los equipos durante el procesamiento o el almacenamiento en góndolas o cámaras de refrigeración, evitándose el contacto directo de las NPs con los alimentos y tienen gran aplicación en el campo de la seguridad alimentaria, detectando patógenos, micotoxinas o alérgenos. También permiten realizar el control ambiental, además de ser utilizados en la agricultura para detectar pesticidas en frutihortícolas y agua.

Kraft Foods desarrolló una lengua electrónica para incluirla en el envase, consistente en un arreglo de nanosensores muy sensibles a los gases liberados por alimentos deteriorados, que generan una señal sensible de frescura mostrando cambio de color (Durán y Marcato, 2013). También se propone el empleo de narices y lenguas electrónicas durante el proceso de fermentación de la cerveza y la detección de contaminación fúngica en cereales, por mencionar algunos ejemplos.

Los biosensores utilizan diversos nanobjetos, nanofibras, NPs, puntos cuánticos y se emplean para inmovilizar anticuerpos, DNA, enzimas, etc. También se dispone de dispositivos portables que utilizan *nanowires* y anticuerpos capaces de detectar, identificar y cuantificar rápidamente los patógenos, sustancias alterantes y alérgenos. Algunos nanosensores están provistos de NPs de Au con anticuerpos y son capaces de detectar e identificar patógenos en leche, jugo de manzana y carnes (Waswa *et al.*, 2007), o tienen xantina oxidasa inmovilizada y son útiles como indicadores de frescura en atún enlatado (Cubukçu *et al.*, 2007). Abargues *et al.* (2014) diseñaron chips con NPs de Au para monitorear la alteración en carnes de pollo, y, Liu *et al.* (2015) desarrollaron detectores quimiorresistivos con CNT modificados con complejos de Co y meso-arilporfirinas para detectar aminas biogénicas y monitorear la alteración de carnes y pescado. También se utilizan sensores con puntos cuánticos de NPs que permiten detectar *S. typhirium* en diversos tipos de carnes (Kim *et al.*, 2015) o *E. coli* O157:H7 (Yang y Li, 2006).

Debido a sus propiedades fotosensibles, las NPs de TiO_2 son utilizadas en la preparación de sensores de O_2 , al igual de NPs de SnO_2 (Mihindukulasuriya y Lim, 2013). También se están desarrollando nanosensores biodegradables para controlar la temperatura y humedad y realizar el monitoreo de dichos parámetros durante el transporte y almacenamiento de los alimentos envasados.

Los sensores diseñados en los últimos tiempos son numerosos y con diferentes objetivos, especialmente debido a la demanda de los consumidores de disponer de alimentos más seguros y naturales, dando como resultado una profusa producción científica y numerosos desarrollos industriales.

Consideraciones finales

La nanotecnología tendrá un potencial de aplicación increíble en el sector alimentario a lo largo de la cadena alimentaria priorizando los requerimientos del consumidor. En la actualidad hay numerosos productos con NMs que se ofrecen en el mercado, especialmente aditivos y materiales de contacto con los alimentos, siendo consumidos generalmente ignorando su presencia.

Uno de los principales problemas de seguridad radica en el desconocimiento del impacto que tienen los NMs al ingresar y acumularse en el organismo. Las NPs pueden ser ingeridas en forma directa, al ser incluidas intencionalmente en el alimento como aditivos, complementos, restos de pesticidas, o bien liberadas por contacto con el material de envasado o migración del mismo. Si bien las NPs tienen propiedades excepcionales que afectan las células microbianas, o incrementan la biodisponibilidad de los bioactivos, podrían ser citotóxicas para las células humanas o causar procesos inflamatorios debido al estrés oxidativo. Por este motivo, es indispensable realizar una correcta evaluación de los riesgos de toxicidad de los NMs a utilizar y contar con un marco legislativo específico que regule esta tecnología.

Finalmente, se debe considerar que la nanotecnología es capaz de proveer nuevas formas de control y estructurado de alimentos con mayor funcionalidad y valor. Esta tecnología aplicada en la industria alimentaria y regulada correctamente puede continuar expandiéndose en forma muy promisoría.

Referencias

- Abargues, R., Rodríguez-Canto, P. J., Albert, S., Suarez, I. y Martínez-Pastor, J. (2014). Plasmonic optical sensors printed from Ag-PVA nanoinks. *Journal of Materials Chemistry C*, 2: 908-915.
- Abdou, E., Galhoumb, G., Mohamed, E. (2018). Curcumin loaded nanoemulsions/pectin coatings for refrigerated chicken fillets. *Food Hydrocolloids*, 83: 445-453.
- Aguilera, J. (2009). Nanotechnology in food products: Workshop summary. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK32727>
- Akbas, E., Betül Soyler, U., Oztop, M. (2018). Capsaicin emulsions: Formulation and characterization. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(8): 1079-1086.
- Amna, T., Yang, J., Ryu, K.-S. y Hwang, I. H. (2015). Electrospun antimicrobial hybrid mats: Innovative packaging material for meat and meat-products. *J. Food Sci. Technol.* 52: 4600-4606.
- Arfat, Y., Ahmed, J., Jacob, H. (2017). Preparation and characterization of agar-based nanocomposite films reinforced with bimetallic (Ag-Cu) alloy nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 155(2): 382-390.
- Artiga-Artigas, M., Acevedo-Fani, A., Martín-Belloso, O. (2017). Improving the shelf life of low-fat cut cheese using nanoemulsion based edible coatings containing oregano essential oil and mandarin fiber. *Food Control*, 76: 1-12.

- Balooch, M., Sabahi, H., Aminian, H., Hosseini, M. (2018). Intercalation technique can turn pomegranate industrial waste into a valuable by-product. *LWT – Food Science and Technology*, 98: 99-105.
- Ban, C., Park, S., Lim, S., Choi, S., Choi, Y. (2015). Improving flavonoid bioaccessibility using an edible oil-based lipid nanoparticle for oral delivery. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 63: 5266-5272.
- Beigmohammadi, F., Peighambaroust, S., Hesari, J., Azadmard, S., Damirchi, S., Peighambaroust, S., Khosrowshahi, N. (2016). Antibacterial properties of LDPE nanocomposite films in packaging of UF cheese. *LWT – Food Science and Technology*, 65: 106-111.
- Bovi, G., Petrus, R., Pinho, S. (2017). Feasibility of incorporating buriti (*Mauritia flexuosa L.*) oil nanoemulsions in isotonic sports drink. *International Journal of Food Science and Technology*, 52: 2201-2209
- Bumbudsanpharoke, N., Ko, S. (2015). Nano-food packaging: An overview of market, migration research, and safety regulations. *Journal of Food Science*, 80: 910-923.
- Costa, C., Conte, A., Buonocore, G., Del, N. (2011). Antimicrobial silver-montmorillonite nanoparticles to prolong the shelf life of fresh fruit salad. *International Journal of Food Microbiology*, 148: 164-167.
- Cozmuta, A. M., Peter, A., Cozmuta, L. M., Nicula, C., Crisan, L., Baia, L. (2015). Active packaging system based on Ag/TiO₂ nanocomposite used for extending the shelf life of bread. *Packaging Technology and Science*, 28: 271-284.
- Cubukçu, M., Timurb, S., Anik, U. (2007). Examination of performance of glassy carbon paste electrode modified with gold nanoparticle and xanthine oxidase for xanthine and hypoxanthine detection. *Talanta*, 74: 434-439.
- Cushen, M. Kerry J., Morris, M., Cruz-Romero, M., Cummins, E. (2012). Nanotechnologies in the food industry e recent developments, risks and regulation. *Trends in Food Science & Technology*, 24: 30-46.
- De Carli, C., Moraes-Lovison, M., Pinho, S. (2018). Production, physicochemical stability of quercetin-loaded nanoemulsions and evaluation of antioxidant activity in spreadable chicken pâtés. *LWT – Food Science and Technology*, 98: 154-161.
- Dehnad, D., Mirzaei, H., Emam-Djomeh, Z., Jafari, S. M. y Dadashi, S. (2014) Thermal and antimicrobial properties of chitosan-nanocellulose films for extending shelf life of ground meat. *Carbohydrate Polymers*, 109: 148-154.
- Deng, Z., Jung, J., Simonsen, J., Wang, Y., Zhao, Y. (2017). Cellulose nanocrystal reinforced chitosan coatings for improving the storability of postharvest pears under both ambient and cold storages. *Journal of Food Science*, 82(2): 453-462.
- Dhital, R., Becerra Mora, N., Watson, D., Kohli, P., Choudhary, R. (2018). Efficacy of limonene nano coatings on post-harvest shelf life of strawberries. *LWT – Food Science and Technology*, 97: 124-134.
- Dias, M. V., Soares, N. de F., Borges, S. V., de Sousa, M. M., Nunes, C. A., de Oliveira, I. R., Medeiro, E. A. (2013). Use of allyl isothiocyanate and carbon nanotubes in an antimicrobial film to package shredded, cooked chicken meat. *Food Chemistry*, 141: 3160-3166.
- Durán, N., Marcato, P. (2013). Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnol-

- ogy in the food industry: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 48: 1127-1134.
- EFSA. (2018). *EFSA Journal 2018*. <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2018.5327>
- FAO/WHO (2013). State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management of nanotechnologies in the food and agriculture sectors. Technical paper. <http://www.fao.org/docrep/018/i3281e/i3281e.pdf>
- Gani, A., Benjakul, S. (2018). Impact of virgin coconut oil nanoemulsion on properties of croaker surimi gel. *Food Hydrocolloids*, 82: 34-44.
- Ghosh, V., Mukherjee, A., Chandrasekaran, N. (2014). Eugenol-loaded antimicrobial nanoemulsion preserves fruit juice against, microbial spoilage. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 114: 392-397.
- Ha, Thi, Kim, S., Choi, Y, Kwak, C., Lee, S., Wen, J., Oey, I., Ko, S. (2015). Antioxidant activity and bioaccessibility of size-different nanoemulsions for lycopene-enriched tomato extract. *Food Chemistry*, 78:115-121.
<https://www.fan.org.ar/potfolios/nutranova-la-linea-de-suplementosdietarios-de-lipomize>. (Consultado, octubre, 2018).
- ISO (International Organization for Standardization) (2015). ISO/TS 80004-2:2015. Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects. 10.
- Khan, A., Salmieri, S., Frascini, C., Bouchard, J., Riedl, B. y Lacroix, M. (2014). Genipin cross-linked nanocomposite films for the immobilization of antimicrobial agent. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6: 15232-15242.
- Kim, G., Moon, J.-H., Moh, C.-Y. y Lim, J. (2015). A microfluidic nano-biosensor for the detection of pathogenic Salmonella. *Biosensors and Bioelectronics*, 67: 243-247.
- Kim, I., Oh, Y., Lee, H., Song, K., Sea C. Min. (2014). Grape berry coatings of lemon-grass oil-incorporating nanoemulsion. *LWT – Food Science and Technology*, 58: 1-10.
- Lane, K., Li, W., Smith, C., Derbyshire, E. (2016). The development of vegetarian omega-3 oil in water nanoemulsions suitable for integration into functional food products. *Journal of Functional Foods*, 23: 306-314.
- Li, X., Li, W., Jiang, Y., Ding, Y., Yun, I., Tang, Y. (2011). Effect of nano-ZnO-coated active packaging on quality of fresh-cut ‘Fuji’ apple. *International Journal of Food Science and Technology*, 46: 1947-1955.
- Liu, S. F., Petty, A. R., Sazama, G. T., Swager, T. M. (2015). Single walled carbon nanotube/metalloporphyrin composites for the chemiresistive detection of amines and meat spoilage. *Angewandte Chemie International Edition*, 54: 6554-6657.
- Lloret, E., Picouet, P. y Fernandez, A. (2012). Matrix effects on the antimicrobial capacity of silver based nanocomposite absorbing materials. *LWT Food Science Technology*, 49: 333-338.
- Luo, Z., Wang, Y., Jiang, L. (2015). Effect of nano-CaCO₃-LDPE packaging on quality and browning of fresh-cut yam. *LWT – Food Science and Technology*, 60(2): 1155-1161.

- Marra, C., Silvestre, D., Duraccio, S., Cimmino (2016). Polylactic acid/zinc oxide biocomposite films for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88: 254-262.
- Martínez-Abad, A., Lagaron, J. M. y Ocio, M. J. (2012). Development and characterization of silver-based antimicrobial ethylene-vinyl alcohol copolymer (EVOH) films for food-packaging applications. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 60: 5350-5359.
- Maurya, S. W. (2018). Is nanotechnology found in food? <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4839>. (Consultado, octubre, 2018).
- Mc Clements, D. (2012). Nanoemulsions *versus* microemulsions: Terminology, differences, and similarities. *Soft Matter*, 8: 1719-1729.
- Metak, A., Nabhani, F., Connolly, S. (2015). Migration of engineered nanoparticles from packaging into food products. *LWT Food Science Technology*, 64: 781-787.
- Mihindukulasuriya, S., Lim, L. (2013). Oxygen detection using UV-activated electrospun poly (ethylene oxide) fibers encapsulated with TiO₂ nanoparticles. *Journal of Material Science*, 48: 5489-5498.
- Ntim, A., Thomas, T., Begley, T., Noonan, G. (2015). Characterization and potential migration of silver nanoparticles from commercially available polymeric food contact materials. *Food Additives and Contaminants Part A*, 32: 1003-1011.
- Orsuwan, A., Wang, L., Sothornvit, R., Rhim, J. (2016). Preparation of antimicrobial agar/banana powder blend films reinforced with silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 60: 476-485.
- Pathakoti, K., Manubolu, M., Hwang, H. (2017). Nanostructures: Current uses and future applications in food science. *Journal of Food and Drug Analysis*, 25 (2): 245-253.
- Picouet, P. A., Fernandez, A., Realini, C. E. y Lloret, E. (2014). Influence of PA6 nanocomposite films on the stability of vacuum-aged beef loins during storage in modified atmospheres. *Meat Science*, 96: 574-580.
- Ravichandran, M., Hettiarachchy, N. S., Ganesh, V., Ricke, S. C., Surendra, S. (2011). Enhancement of antimicrobial activities of naturally occurring phenolic compounds by nanoscale delivery against *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella typhimurium* in broth and chicken meat system. *Journal of Food Safety*, 31: 462-471.
- RIKILT y JRC (2014). Inventory of nanotechnology applications in the agricultural, feed and food sector. EFSA supporting publication. <https://www.efsa.europa.eu/en/supporting/pub/en-621>
- Shadman, S., Hosseini, S., Langroudi, H., Shabani, S. (2018). Evaluation of the effect of a sunflower oil-based nanoemulsion with *Zataria multiflora* Boiss essential oil on the physicochemical properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) filets during cold storage. *LWT – Food Science and Technology*, 9: 511-517.
- Silva, W., Torres-Gatica, M., Oyarzun-Ampuero, F., Silva-Weiss, A., Paz, R., Cofrades, S., Giménez, B. (2018). Double emulsions as potential fat replacers with gallic acid and quercetin nanoemulsions in the aqueous phases. *Food Chemistry*, 253: 71-78.
- Wang, T., Soyama, S., Luo, Y. (2016). Development of a novel functional drink from

- all natural ingredients using nanotechnology. *LWT – Food Science and Technology*, 73: 458-466.
- Waswa, J., Irudayaraj, J., DebRoy, C. (2007). Direct detection of *E. Coli* O157:H7 in selected food systems by a surface plasmon resonance biosensor. *LWT – Food Science and Technology*, 40(2): 187-192.
- Xing, Y., Li, X., Zhang, L., Xu, Q., Che, Z., Li, W., Bai, Y. (2012). Effect of TiO₂ nanoparticles on the antibacterial and physical properties of polyethylene-based film. *Progress in Organic Coatings*, 73(2): 219-224.
- Yang, L., Li, Y. (2006). Simultaneous detection of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella typhimurium* using quantum dots as fluorescence labels. *Analyst*, 131: 394-401. <http://dx.doi.org/10.1039/b510888h>
- Zhang, H., Hortal, M., Jordá-Beneyto, M., Rosa, E., Lara-Lledo, M., Lorente, I. (2017). ZnO-PLA nanocomposite coated paper for antimicrobial packaging application. *LWT – Food Science and Technology*, 23: 250-257.
- Zimoch-Korzycka, A., Jarmoluk, A. (2015). The use of chitosan, lysozyme, and the nano-silver as antimicrobial ingredients of edible protective hydrosols applied into the surface of meat. *Journal of Food Science and Technology*, 52: 5996-6002.