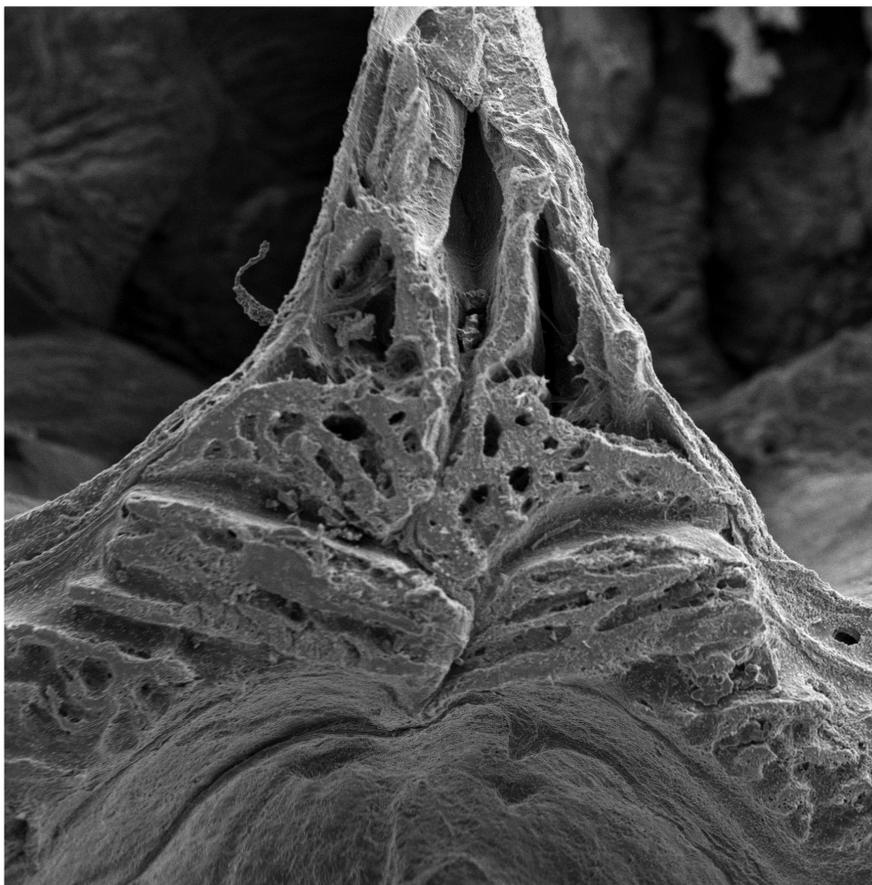


■ **Corte frontal de feto humano. Osificación intramembranosa.**

Técnica: Microscopía electrónica de barrido.

La imagen muestra la fusión del tabique inter-nasal y los procesos palatinos.



Fotografía 2 ■

6/17/2008 11:31:52 AM | HV 15.0 kV | Det ETD | Mag 80x | VacMode High vacuum |
Fotografía realizada en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia |

 1.0 mm

Zoila Castañeda Murcia, OD, MSc. Universidad El Bosque, Colombia.

© Todos los derechos reservados. Esta fotografía no puede ser reproducida ni total ni parcialmente, sin el permiso previo de la autora.



Artículo de revisión

La nanotecnología y los retos de sostenibilidad del sistema agroalimentario

Nanotechnology and the sustainability challenges of the agri-food system

Nanotecnologia e os desafios da sustentabilidade do sistema agroalimentar

Recibido: 20 | 06 | 2017

Aprobado: 10 | 10 | 2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.18270/rsb.v7i2.2193>

Resumen

¿Pueden pequeñas cosas ayudarnos a reducir el hambre, la mala nutrición y las enfermedades transmitidas por alimentos? En realidad, la nanotecnología es al mismo tiempo un enfoque científico y un conjunto de tecnologías emergentes, tal vez las más detalladamente observadas en la historia. Actualmente, es un blanco de investigación en el cual se focalizan muchos de los recursos destinados a la financiación en ciencia, tecnología e innovación por parte de agencias públicas y privadas.

De la nanotecnología se ha dicho, por más de una década, que guarda un potencial revolucionario que abarcaría la mayoría de las actividades productivas humanas, incluyendo aquellas propias del sector agroalimentario. Este sector, del cual depende directamente el abastecimiento de alimentos y, por ende, la seguridad alimentaria, sin duda enfrenta retos extraordinarios derivados de las presiones demográficas, las limitaciones en la disponibilidad de recursos como agua, energía y tierra, las pérdidas de alimentos en las cadenas de suministro y el cambio climático.

En esta revisión se busca dar una visión introductoria a las potenciales aplicaciones de la nanotecnología relacionadas con alimentos y nutrición, en el contexto de los problemas globales de sostenibilidad. Asimismo, brinda consideraciones sobre los riesgos potenciales, el marco regulador y el rol de la nanotecnología agroalimentaria en los países en desarrollo.

Palabras clave: nanotecnología; nanoestructuras; nanomateriales; sistema agroalimentario; seguridad alimentaria.

Carlos Alberto Fuenmayor

Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos,

ICTA, Universidad Nacional de Colombia,

Bogotá, D.C., Colombia

Correspondencia: cafuenmayorb@unal.edu.co

Abstract

Can small efforts help to reducing famine, malnourishment and foodborne diseases? Nanotechnology is both a scientific approach and an emerging field in which major resources aimed at funding science, technology and innovation are channeled. For over a decade, Nanotechnology has been referred to as having a revolutionary potential regarding the agri-food sector. This sector is accountable for food supply and food security and faces immense challenges related to current demographic trends, limited access to natural resources such as water, energy, land, food losses in supply chains and climate change. This present literature review aims at providing an introductory overview on potential nanotechnology applications for global sustainability challenges regarding food and nutrition. The review also provides considerations on potential risks, legal frameworks and the role of agri-food nanotechnology in developing countries

Keywords: nanotechnology; nanostructures; nanomaterials; food supply; food security

Resumo

Podem pequenas coisas nos ajudar a reduzir a fome, a mal nutrição e as doenças transmitidas por alimentos? A nanotecnologia é, na verdade, tanto um enfoque científico e um conjunto de tecnologias emergentes, talvez as mais detalhadamente observadas na história. Atualmente é também um objeto de pesquisa muito financiado por recursos para as ciências, tecnologia e inovação. Muito tem sido falado a respeito do potencial revolucionário que esta tecnologia tem na maior parte das atividades produtivas humanas. Do setor agroalimentar depende o abastecimento alimentar e a segurança alimentar, enfrenta desafios enormes como pressões demográficas, limitações na disponibilidade de recursos como a água, a terra, a energia, perdas de alimentos nas cadeias de subministros e aquecimento global. Esta revisão tem o intuito de apresentar possíveis aplicações da nanotecnologia ao nos alimentos e nutrição no contexto dos problemas globais de sustentabilidade. Ao mesmo tempo que alerta sobre possíveis riscos potenciais no marco regulatório nos países em desenvolvimento.

Palavras chave: nanotecnologia, nanoestruturas, nanomateriais, sistema agroalimentar, segurança alimentar.

Introducción

Sobre la nanotecnología, se ha afirmado que ofrece un enfoque revolucionario para muchas industrias, en diferentes campos de las 'sociedades tecnológicas' contemporáneas, y que tiene implicaciones en muchos aspectos de la experiencia de vida cotidiana de los seres humanos. Se ha estimado que, para 2014, el presupuesto público en todo el mundo dedicado a la investigación en nanotecnología alcanzó los USD\$ 100.000 millones. En cuanto a la financiación privada –que es probable que sea mayor que la financiación del gobierno– en 2011, una agencia de investigación de mercado estimó que alrededor de doscientos cincuenta millones de dólares se habrán invertido en el 2015 en una carrera mundial para desarrollar y aplicar las nanotecnologías (1), con un impacto en el mercado global de mil millones de dólares y, aproximadamente, 2 millones de puestos de trabajo (2). El número de publicaciones revisadas por pares en relación con la nanotecnología ha ido aumentando continuamente en las últimas dos décadas, pasando de casi 40 en 1990

a más de 3.000 en 2000 y más de 75.000 en 2016¹. En suma, podría decirse que se trata de un tema que despierta gran interés, tanto en la academia como en la industria y la sociedad.

Una de las definiciones más comúnmente usadas es la de la *United States National Nanotechnology Initiative* (3), que afirma que la nanotecnología se refiere a “la comprensión y el control de la materia en dimensiones entre 1 a 100 nanómetros, aproximadamente, en las cuales fenómenos únicos hacen posibles nuevas aplicaciones”. Para entenderlo mejor, un nanómetro (1 nm) es una milésima de una milésima de una milésima de un metro (1 nm = 1 x 10⁻⁹ m). Un objeto de 1 nm

1 *Web of Science, scientific data analyzer*. Resultados de los últimos 25 años de publicaciones revisadas por pares, incluyendo los descriptores temáticos “nano” o “nanotechnology” o “nanomaterials” o “nanoparticles”. Thomson Reuters, web of knowledge, 2 de junio de 2017.

es, por ejemplo, 60.000 mil veces más pequeño que un cabello humano en diámetro, o 100.000 veces más delgado que una hoja de papel típica, o 3.000 veces más pequeño que un glóbulo rojo, o la mitad del diámetro de la doble hélice de ADN (4). La nanotecnología, como concepto que comprende tanto el estudio científico como el desarrollo ingenieril, se refiere al estudio, la modificación y la aplicación de objetos o materiales a una escala muy pequeña, y es transversal a muchos campos científicos que van desde la física, la química y la biología, hasta la ciencia de los materiales y la ingeniería.

Es importante anotar que con frecuencia los llamados 'nanomateriales' ocurren de manera natural. Las membranas celulares, las micelas proteicas en la leche, las hélices del ADN y algunos carbohidratos son todos nanoestructuras que hacen parte del mundo viviente. De hecho, en la naturaleza es común encontrar nanomateriales autoensamblados con distintas funcionalidades (5). Aunque la nanotecnología moderna existe desde hace unas tres décadas –más o menos desde el desarrollo de los microscopios electrónicos–, el hecho es que los nanomateriales han sido empleados durante siglos. Por ejemplo, son bien conocidos los nanotubos o nanopartículas de metal que se utilizaron en la fabricación de antiguos dispositivos de guerra y en elementos artísticos o decorativos (6).

La nanotecnología se basa en características o comportamientos peculiares, por ejemplo, fenómenos mecánicos, ópticos, eléctricos o magnéticos, que en ocasiones exhiben los materiales cuando están estructurados de tal forma que al menos una de sus dimensiones características (por ejemplo, el diámetro de una partícula o el espesor de una película) se encuentra entre 1 y 100 nm, es decir, se encuentra en la nanoescala. En comparación, los equivalentes convencionales de tales materiales no tienen esas características o comportamientos peculiares.

Los fenómenos que se observan en los nanomateriales ocurren debido a efectos cuánticos u otros efectos físicos más sencillos producto de la reducción de tamaño. Por ejemplo, hay un material que normalmente aparece brillante y amarillo al ojo humano y, cuando se reduce su tamaño hasta volverlo nanopartículas, se vuelve rojo o púrpura, sin que esto implique un cambio en la estructura química de sus moléculas. Ese es el caso del oro. El nano-oro no es simplemente más pequeño: interactúa de manera muy distinta con la luz en comparación con el oro a granel, ya que el movimiento de los electrones del oro está confinado –un

físico lo llamaría 'efecto plasmón'– (7). Esta propiedad, y otras, han encontrado no cientos, sino miles, de aplicaciones prácticas que van más allá de la decoración: la fabricación de catalizadores petroquímicos, dispositivos electrónicos (8), sensores para el diagnóstico de enfermedades y medicamentos para el tratamiento del cáncer, entre otras (9).

Otros ejemplos están relacionados con el hecho de que, cuando una cierta cantidad de material se divide en partículas más pequeñas, su área superficial aumenta. Cuando se divide hasta que se encuentre en la nanoescala, el incremento es notable. Tales áreas superficiales en relación con el peso del material tienen una gran implicación tecnológica, como en el caso del desarrollo de catalizadores para hacer más 'limpios' y eficientes los reactores químicos (10). Además, los materiales que se disuelven lentamente o que no son solubles, pueden formar dispersiones o soluciones de manera rápida, eficiente y estable, lo cual es de gran aplicabilidad en la industria cosmética, la farmacéutica y la alimentaria.

Promesas de la nanotecnología en agricultura y alimentos

Las aplicaciones de la nanotecnología abarcan una amplia gama de industrias y mercados, incluyendo la biomédica (particularmente, en el tratamiento del cáncer), productos farmacéuticos, conservación del medio ambiente, energía renovable, cuidado personal, revestimientos superficiales, plásticos, textiles, materiales de construcción, automoción, agricultura y alimentos, entre otros (11).

En realidad, probablemente ya estamos comprando nanotecnología en el supermercado. Aunque es difícil encontrar datos exactos, es cierto que una serie de productos de consumo basados en nanomateriales ya están disponibles en los mercados. En 2010, había más de 1.300 bienes de consumo basados en nanomateriales, pero es probable que esta sea una estimación muy conservadora y que el número haya aumentado (12).

En el caso particular del sector agroalimentario, la nanotecnología ofrece muchas aplicaciones potenciales y posibles soluciones a problemas en prácticamente todos los niveles (13,14): desde la productividad agrícola y el cuidado de los animales destinados al consumo humano, hasta la conservación de los alimentos; desde la detección de agentes patógenos y contaminantes, hasta el procesamiento; desde aditivos alimentarios, hasta análisis de alimentos, y desde desarrollo

de alimentos funcionales, hasta el tratamiento de residuos relacionados con los alimentos.

Las problemáticas que amenazan la seguridad alimentaria y afectan la sostenibilidad del sistema productivo agroalimentario son varias y de gran complejidad. Para empezar, el reciente informe sobre el hambre de la Organización de Naciones Unidas (ONU), trajo noticias 'modestamente buenas': en las regiones en desarrollo, la proporción de personas desnutridas o que no consumen suficientes alimentos para llevar una vida activa y saludable se ha reducido a la mitad desde 1990, pasando de 23,3 % a 12,9 % (15), y cerca de la mitad de los 129 países supervisados por la ONU-FAO han logrado reducir la prevalencia del hambre en 50 %. Esto, sin embargo, significa que el problema afecta a más de 800 millones de personas, sin tener en cuenta el grave problema de las deficiencias específicas de minerales o vitaminas (16).

En el otro lado de la moneda, está la epidemia del sobrepeso y de la obesidad que afecta a muchas partes del mundo, no solo en las sociedades ricas, lo que contribuye significativamente a la prevalencia de las enfermedades crónicas y la discapacidad. Las estimaciones indican que más de 300 millones de personas sufrieron problemas de obesidad en el 2000 (17), pero, sin duda, el problema ha aumentado en la última década. Además, las enfermedades transmitidas por alimentos contaminados con microorganismos siguen siendo responsables de gran morbilidad y mortalidad, particularmente en grupos de riesgo: lactantes, niños, ancianos y personas con deficiencias inmunológicas. La ausencia de datos epidemiológicos confiables dificulta la comprensión de su importancia para la salud pública, pero seguramente, esta sigue siendo una de las amenazas más graves para la seguridad alimentaria en todo el mundo (18).

Varios estudiosos han revisado críticamente el estado de la técnica y los beneficios potenciales de la nanotecnología en este sector (14,19-25). Algunas de estas revisiones han puesto la nanotecnología en un contexto histórico y han mantenido un ojo en el desarrollo humano y la sostenibilidad, mientras que otros se concentran en los aspectos científicos y tecnológicos. Es posible, sin embargo, notar que existe una amplia atención de los autores a las posibles restricciones y riesgos, y a los problemas de percepción pública, probablemente basados en la experiencia con cultivos transgénicos.

Cabe mencionar que, a pesar de la gran promesa de la nanotecnología, existen riesgos potenciales para la

salud y preocupaciones ecológicas que crean ambigüedad sobre su uso en aplicaciones relacionadas con los alimentos, riesgos que deben ser considerados y estudiados tan pronto como sea posible, bajo la luz de la seguridad, la sostenibilidad y el desarrollo humano, para cada aplicación particular de la nanotecnología. De lo contrario, los productos agroalimentarios relacionados con la nanotecnología podrían ser rechazados o prohibidos, algo que ya sucedió con los *organismos genéticamente modificados*.

A pesar de los riesgos y limitaciones, que se discuten más adelante, parece haber un acuerdo en que la nanotecnología puede aportar en gran medida en algunas áreas del sector agroalimentario (14,24,26).

En la productividad agrícola, las aplicaciones en desarrollo o ya existentes incluyen: mejoramiento genético de plantas y animales, sensores de precisión para la agricultura, manejo de recursos naturales y sistemas inteligentes de suministro de agroquímicos, como fertilizantes y pesticidas, entre otros (14,27).

A lo largo de toda la cadena de suministro de alimentos, la nanotecnología puede utilizarse en sensores para la detección temprana de agentes patógenos y contaminantes, en el procesamiento y envasado de alimentos inteligentes. Las nanoemulsiones antimicrobianas se pueden utilizar en la descontaminación de equipos alimentarios. Los dispositivos inteligentes de nanoencapsulación con características de liberación, pueden permitir la reducción de conservantes añadidos a los alimentos procesados y la mejora de la biodisponibilidad de nutrientes dentro del organismo humano (28).

A continuación, se presenta un breve resumen de aplicaciones de la nanotecnología, identificadas como aquellas con mayor potencial para aliviar problemas de sostenibilidad del sector agroalimentario, con algunos ejemplos seleccionados.

Productividad agrícola y pecuaria de alimentos: producir más, usando menos

Desde la perspectiva de la producción primaria de alimentos, las estrategias para mejorar el acceso a alimentos nutritivos incluyen: a) mejorar las variedades de especies cultivables de modo que sean capaces de proveer más cantidad de nutrientes relevantes; b) producir más cantidad de alimentos con alto valor nutritivo reduciendo la distancia a los mercados, especialmente, en territorios de comunidades con problemas de seguridad alimentaria (esto es, producir más alimentos

en donde más se necesite), y c) producir alimentos empleando tecnologías de alto rendimiento que reduzcan pérdidas y costos. En este punto, es importante anotar que las estrategias son muy similares a las de la *Green Revolution* de la posguerra a mediados del siglo XX. Lograrlas significó (y sigue significando) cultivos más intensivos y extensivos, así como poner más tierra a producir. Hoy, sin embargo, resulta obvio que tal intensificación trae consigo consecuencias ambientales que disminuyen la sostenibilidad de dichas estrategias, principalmente debido al uso de pesticidas y a la dependencia de recursos no renovables, y por los efectos que los monocultivos, la ganadería y la deforestación tienen sobre la biodiversidad (29,30).

Las nuevas tecnologías para una intensificación agrícola-agropecuaria sostenible, entonces, deben estar enfocadas en la producción de más alimentos a partir de la misma (o menor) cantidad de terreno, mientras reducen los impactos del consumo de energías no renovables y, además, deben partir de consideraciones sobre la salud pública y los efectos sociológicos que puedan ejercer.

En este contexto, existen diferentes casos de estudio en los cuales la nanotecnología ofrecería soluciones que tienen en cuenta los factores antes mencionados, como los siguientes.

Pesticidas, herbicidas y biocidas nanoestructurados

Cuando se aplican de la forma tradicional, los agroquímicos están sujetos a factores climáticos que los descomponen parcialmente. Además, una parte de estas sustancias no llegan a los destinos deseados, donde ejercen la acción protectora del cultivo. Esto se traduce en la necesidad de aplicarlos periódicamente o en exceso, lo cual conlleva un incremento en su huella ambiental y sus costos asociados. Una alternativa que ha sido explorada desde la nanotecnología, es que estas sustancias pueden ser encapsuladas en nanopartículas para su liberación prolongada o, incluso, para que reaccionen a estímulos específicos, como determinados factores ambientales. Tales sistemas de liberación 'inteligente' tienen características como pequeño tamaño, mejor solubilidad, más estabilidad y mejor capacidad de ser absorbidos, lo cual permite optimizar la aplicación y, como resultado, reducir los daños colaterales para los trabajadores agrícolas y el ambiente (31).

La avermectina, un pesticida usado contra nemátodos y artrópodos, fue cargado en nanopartículas de sílice porosa (*Porous Hollow Silica Nanoparticles*, PHSN)

(32). La sustancia encapsulada demostró una liberación prolongada que, además, podía ser modulada por condiciones de temperatura y acidez del suelo. En otro trabajo de estos mismos investigadores, se encapsuló un fungicida, la validamicina, en este mismo tipo de nanopartículas, con buenos resultados en términos de tiempo de liberación. También, se han usado nanopartículas poliméricas para encapsular pesticidas sintéticos, lo cual incrementa su actividad biológica contra plagas específicas (33). Esta tecnología ha sido usada para mejorar la factibilidad del uso de aceites esenciales como biocidas naturales (34). Estos representan una toxicidad mucho más baja para los humanos y otros animales, y son menos persistentes en los humanos. Compañías como Bayer Crop Science, BASF, Syngenta y Monsanto, realizan investigación en esta área y han comercializado biocidas en emulsiones que contienen nanopartículas (35).

Nanofertilizantes y agentes para mejorar el suelo

La calidad del suelo es el punto más crítico para mejorar el rendimiento de los cultivos en muchas áreas con problemas de seguridad alimentaria (36), por lo cual los fertilizantes juegan un rol crítico en su capacidad de producir alimentos. Hasta el 70 % del nitrógeno aplicado a los cultivos mediante fertilizantes convencionales para mejorar las condiciones del suelo, se pierde debido a diferentes motivos. Un principio similar al descrito anteriormente puede usarse para mejorar la acción de los fertilizantes, en este caso, para reducir las pérdidas de nitrógeno (37). El nitrógeno encapsulado en nanopartículas puede aprovecharse mejor, ya que los tejidos absorbentes de las plantas son nanoporosos, lo cual haría a los fertilizantes más eficientes y económicos a largo plazo (33). Las zeolitas, que son silicatos de aluminio nanoporosos que se encuentran naturalmente o son sintetizados, posibilitan el intercambio iónico y la deshidratación reversible. Estas pueden aumentar la porosidad de los suelos arcillosos y la capacidad de retención de agua de los suelos arenosos, lo cual ayudaría en la reparación y el aumento de la productividad agrícola en tierras secas (38).

Nanosensores para agricultura de precisión

La agricultura de precisión se refiere a tecnologías de información aplicadas al manejo a gran escala de la agricultura. Este conjunto de tecnologías promete rendimientos más altos y menores costos mediante la simplificación y la centralización de las tomas de decisiones. Se basa en el control exhaustivo y constante de

las condiciones ambientales. Para esto, se requieren sensores inalámbricos omnipresentes que usen dispositivos en la nanoescala (24). Estos sensores permiten la detección de contaminantes, pestes, contenido de nutrientes, estrés debido a sequía, temperatura, presencia de patógenos y falta de nutrientes. La aplicación de nanosensores o sensores nanoestructurados puede extender la vigilancia, incluso, a la composición química de los cultivos, por ejemplo, para decidir sobre las fechas óptimas de cosecha (39). Aunque aún estas tecnologías no están disponibles comercialmente, según algunos expertos, lo estarán en un futuro cercano (19).

Alimentos para animales y otras ayudas agropecuarias

Se han desarrollado nanopartículas de poliestireno bioactivo para alimentos de aves de corral, capaces de adherirse a bacterias patógenas (40). Además, se ha demostrado que los nanocompuestos de montmorillonita reducen los efectos nocivos de la aflatoxina en las aves de corral (41). Los compuestos de nanopartículas de dióxido de titanio con propiedades fotocatalíticas y recubrimientos antimicrobianos de nanopartículas de plata, se han aprobado para su uso industrial en granjas avícolas, como agentes antibacterianos y antivirales, lo cual permitiría evitar la aparición o la proliferación de enfermedades zoonóticas en estos sitios de producción de alimentos (19).

Cadena de suministro: alimentos sanos y menores pérdidas del campo a la mesa

Garantizar el acceso a los alimentos significa que, no solo se deben producir (o transformar), sino llegar con seguridad a los consumidores en sus territorios. De hecho, la parte de la cadena de suministro que se refiere al transporte, procesamiento, distribución, envasado y almacenamiento de alimentos, es una de las áreas más críticas en la seguridad alimentaria, ya que es determinante de la calidad, la disponibilidad y el precio. Uno de los temas centrales son las pérdidas después de la cosecha. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que 1.300 millones de toneladas de alimentos ya cosechados se estropean y se desperdician en todo el mundo cada año (42). Nada más en Colombia, las últimas estimaciones indican que, por lo menos, se pierden y desperdician 9,76 millones de toneladas de alimentos, equivalentes al 34 % de la oferta disponible destinada al consumo humano, que podrían, por ejemplo, alimentar durante ocho años a toda la población de La

Guajira (43). Las estrategias para reducir las pérdidas en la parte de la cadena de suministro correspondiente a la poscosecha, incluyen: a) transporte controlado por el clima, b) sistemas de envasado adecuados, y (c) herramientas eficientes para evaluar, vigilar y predecir la calidad de los alimentos.

La nanotecnología, en este contexto, ofrecería posibilidades tecnológicas en varios niveles, como los siguientes.

Empaque, conservación y distribución

El sector de empaques es, posiblemente, en el cual las aplicaciones de la nanotecnología son más visibles actualmente (25).

Algunas de las aplicaciones nanotecnológicas más prometedoras en el envasado de alimentos, son nanocompuestos o matrices poliméricas como refuerzos de otros materiales, con menos de 100 nm de tamaño (25). Además, los polímeros estructurados en forma de membranas o tejidos nanofibrosos pueden mejorar sus propiedades mecánicas y de barrera, y su capacidad de degradación (44).

Otras aplicaciones en este campo están relacionadas con el desarrollo de empaques activos, es decir, materiales que incluyen principios activos antimicrobianos o antioxidantes que protegen la matriz alimentaria. Algunos ejemplos son: polímeros plásticos con nanopartículas de plata y óxido de cinc con acción antimicrobiana, dióxido de nanotitanio para protección contra los rayos ultravioleta (45), y materiales de grado alimentario, o incluso comestibles, basados en compuestos naturales antimicrobianos (tales como aceites esenciales) incorporados en nanofibras biopoliméricas que permiten una liberación específica (46).

La investigación en nanocompuestos para aplicaciones en empaques ha privilegiado materiales menos contaminantes, biodegradables o, incluso, comestibles, tales como pululano, almidón, proteína de soya, ácido poliláctico, quitosano, zeína, alginatos, etc. (25). Estos bionanocompuestos se convierten en una alternativa importante, ya que son más respetuosos con el medio ambiente en comparación con los plásticos tradicionales derivados del petróleo.

Nanosensores y nanobiosensores para empaques 'inteligentes'

La nanotecnología ha permitido, también, desarrollar prototipos de envases capaces de responder activamente a ciertos cambios en el producto o en el entorno

del envase. Por ejemplo, los polímeros que contienen partículas cromógenas que actúan como nanosensores, cambiando su color al contacto con sustancias indicadoras de contaminación o, incluso, microorganismos (47). Se han desarrollado métodos basados en la nanotecnología para detectar agentes patógenos dañinos. Este es el caso de un nanobiosensor capaz de identificar la presencia de *Escherichia coli* y prevenir el consumo de alimentos contaminados (48).

Formulación y procesamiento de alimentos

Otra preocupación importante está relacionada con el uso de los auxiliares de procesamiento o de formulación de alimentos y la percepción pública de sus peligros potenciales. Las enfermedades transmitidas por los alimentos son causadas principalmente por la presencia de microorganismos y contaminantes que llegan a los productos durante el procesamiento, la preparación o el almacenamiento doméstico (49). Además del uso de empaques, procesos térmicos y refrigeración, históricamente se ha recurrido al uso de conservantes naturales o sintéticos, especialmente en los alimentos de consumo masivo, pero también en servicios de alimentación o restauración.

Las estrategias tecnológicas para abordar estos problemas incluyen la búsqueda de tecnologías precisas y económicamente viables para reducir la cantidad de ayudas artificiales, manteniendo al mismo tiempo el equilibrio de la calidad general, y la creación de ingredientes y productos funcionales que aumenten la absorción de compuestos bioactivos o los nutrientes donde existan deficiencias: los llamados ‘alimentos funcionales’. También en este caso, se pueden encontrar opciones basadas en la nanotecnología, como las siguientes.

Nanoestructuras comestibles para innovar o mejorar características sensoriales

Las nanoemulsiones fabricadas a partir de ingredientes de grado alimentario, se utilizan cada vez más en la industria. Estas tienen una serie de ventajas potenciales sobre las emulsiones convencionales, por ejemplo, mayor estabilidad, gran claridad óptica y gran capacidad de modular la textura del producto (50). Una mayor superficie significa que los ingredientes saborizantes interactúan más con los órganos sensoriales y, de esa manera, las nanoemulsiones permiten el uso de menos grasa, manteniendo el gusto de los productos. Por ejemplo, Unilever desarrolló hace más de una década helados de excelente palatabilidad, bajos en grasa, mediante esta tecnología, logrando disminuir el contenido

de grasa de 16 % a 1 % (51). Se han propuesto complejos supramoleculares de inclusión en ciclodextrinas para mejorar la estabilidad de los colorantes alimentarios naturales (como los carotenoides) y sus propiedades de solubilidad, al incorporarlos a las bebidas, lo cual podría ser una opción para reemplazar colorantes potencialmente dañinos, como la tartrazina (52).

La idea de la *nanodelivery*, o liberación de compuestos activos desde nanoestructuras, se deriva de la investigación en liberación dirigida de medicamentos en el sector farmacéutico. El uso de tales tecnologías en los productos alimenticios es interesante, porque puede ofrecer una mayor absorción o biodisponibilidad de los nutrientes, al tiempo que tiene el potencial de alterar la distribución tisular de las sustancias en el organismo (53). Por ejemplo, los compuestos solubles en agua se pueden dispersar en grasa y viceversa, permitiendo una serie de aplicaciones de otro modo inviables (el mismo principio de las nanoemulsiones). Para que estas aplicaciones funcionen, el vehículo o material de soporte, que tiene que ser un material seguro, debe ser degradado a medida que su contenido se distribuye en las partes deseadas del tubo digestivo.

Se han empleado liposomas, nanofibras biopoliméricas, nanomicelas o sistemas portadores basados en proteínas, para desarrollar sistemas de administración de suplementos y aditivos. Los nutraceuticos y los compuestos bioactivos (por ejemplo, licopeno, β -caroteno, luteína, fitoesteroles, antioxidantes, etc.) han sido encapsulados en estructuras nanométricas para suministrar nutrientes a las células. Algunos de ellos han sido patentados o, incluso, ya están disponibles en el mercado (24).

Se han utilizado nanopartículas de sílice mesoporosa con puertas moleculares (moléculas que se ‘abren’ o se ‘cierran’ según estímulos determinados) para incorporar vitaminas y antioxidantes, entre otros, que permiten además una liberación dirigida (54). También, se han utilizado nanopartículas de zeína para encapsular compuestos biológicamente activos solubles en agua o liposolubles (55). La nanoencapsulación de probióticos ha sido estudiada y patentada para una mayor supervivencia, durante el paso por el tubo digestivo humano y durante el procesamiento o almacenamiento (56).

Filtración selectiva y nanoimmobilización para catálisis enzimática

En la industria de procesamiento de alimentos, acortar los tiempos y el consumo energético son aspectos

importantes y tienen un impacto en la huella ambiental y el precio de mercado del producto final. La filtración, por ejemplo, es una operación unitaria clave en la industria de bebidas para la clarificación, la estabilización y la concentración de líquidos.

Se ha demostrado que las membranas nanofibras producidas por la técnica de *electrospinning* ofrecen ventajas en comparación con otros dispositivos de filtración, como la eliminación selectiva de compuestos (por ejemplo, polifenoles amargos) y para facilitar los procesos de clarificación en un solo paso, lo que reduce los costos y la necesidad de coadyuvantes de filtración (57).

Los sistemas de inmovilización se utilizan para mejorar la gran propensión de las enzimas a degradarse. Aunque en la actualidad hay muy pocas patentes, se ha demostrado que las nanoestructuras como nanoesferas, nanofibras y nanotubos, proporcionan una alternativa ideal de inmovilización de enzimas, con la ventaja de ofrecer limitaciones mínimas de difusión y gran carga enzimática, lo que se traduce en una mayor eficiencia (58). Esto sería relevante en industrias como la de panificación, fabricación de azúcar y jarabes, y en la industria de lácteos.

Vigilancia, control y control de calidad de los alimentos

Con el fin de garantizar la inocuidad de los alimentos, y para aumentar la información sobre su composición, muchas nuevas técnicas de evaluación se están desarrollando mediante dispositivos que emplean nanotecnología. Estos permiten la detección de agentes patógenos y sustancias tóxicas, y la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y la composición de los alimentos, con gran precisión, sensibilidad y de forma simplificada. Estas herramientas analíticas son útiles en todas las etapas del sistema agroalimentario, incluyendo la labor de vigilancia de las entidades públicas que operan en este ámbito.

Nanosensores y nanobiosensores

Algunos sensores de base nanotecnológica incluyen nanotubos de carbono, matrices de nanopartículas, como puntos cuánticos (*quantum dots*), y sensores electroquímicos y ópticos constituidos o modificados con nanoestructuras. En esta categoría, los nanobiosensores son muy prometedores, ya que combinan las ventajas de los sensores nanoestructurados con la gran selectividad de los componentes biológicos (marcadores

de ADN, anticuerpos, enzimas, microorganismos, etc.) para interactuar específicamente con el analito. Hasta ahora, existe un gran número de aplicaciones exitosas, así como una profusa bibliografía sobre el uso de nanosensores para detectar y cuantificar una amplia gama de microorganismos, esporas, agentes tóxicos, y casi todos los principales macrocompuestos y microcompuestos (59).

Riesgos sanitarios y ambientales y preocupaciones de regulación

Las principales preocupaciones relativas al uso de nanotecnología en el sector agroalimentario se refieren a aquellas aplicaciones en las que las nanopartículas entran en contacto con los productos o ingredientes alimentarios, especialmente –pero no exclusivamente– cuando las nanopartículas no están hechas de materiales comestibles o biodegradables. Debido a sus características únicas, las nanopartículas pueden cruzar los límites de los órganos y las membranas celulares o llegar al torrente sanguíneo. Esta es la razón por la que pueden representar un mayor riesgo que las mismas cantidades de materiales en partículas más grandes (60).

Se ha demostrado la inocuidad de algunos nanomateriales destinados a ser ingeridos; sin embargo, aún con la creciente información y los espacios editoriales científicos recién aparecidos (es de mencionar la revista *Nanotoxicology*, enteramente dedicada a trabajos de este tipo), por ahora todavía hay una necesidad de más información sobre la posible toxicidad de los nanomateriales alimentarios.

Por otra parte, a medida que se fabriquen más productos que contengan nanomateriales, habrá más peligros ambientales. Según Brayner, *et al.* (61), el mayor uso y vertimiento al ambiente de nanopartículas, especialmente de aquellas que no son fácilmente degradables, eventualmente resultará en su acumulación en aire, suelo, agua y organismos. Esto no solo se refiere a las aplicaciones agroalimentarias, sino que implica todas las demás actividades humanas que se desarrollarán con los nanomateriales. En el caso de las plantas, por ejemplo, una vez en la superficie de la hoja, las nanopartículas pueden penetrar en los tejidos a través de los estomas o de las bases de los tricomas y, luego, transportarse a diferentes tejidos.

Si bien no hay necesidad de crear pánico, ya que casi todos los nuevos nanoingredientes deben pasar los controles como cualquier otro nuevo ingrediente alimenticio –o más rigurosos– para ser comercializados,

todavía hay un vacío de conocimiento sobre los factores de riesgo, como la toxicidad de las nanopartículas, su bioacumulación, exposición o riesgos de ingestión, lo que causa preocupación.

Es de gran importancia que las agencias regulatorias encuentren un equilibrio entre un control preciso de estas tecnologías y la posibilidad de desencadenar una reacción injustificadamente negativa del consumidor. De hecho, algunos analistas han sugerido que las regulaciones no deben introducirse ni demasiado temprano ni demasiado tarde (62). Por el momento, los organismos gubernamentales y no gubernamentales de todo el mundo, especialmente en los países desarrollados, comenzaron a establecer normas regulatorias en la década pasada. En los países con una confianza relativamente baja en las nuevas tecnologías alimentarias (como Japón y los países de la Unión Europea), se observa un enfoque precautorio (19), con medidas reguladoras que se aplican preventivamente, mientras que países como los Estados Unidos y probablemente aquellos países con economía emergente, enfatizan las potencialidades y abordan las regulaciones de riesgo basadas en datos publicados. Los países en desarrollo, como Colombia, parecen estar en algún punto intermedio.

¿Una oportunidad para los países en desarrollo?

Existe un discreto entusiasmo por las posibilidades de la nanotecnología en el sector agroalimentario de los países en desarrollo. Muchos desafíos deben ser superados por los proponentes de estas tecnologías emergentes, para asegurar que la promesa de la nanotecnología en este sector beneficie realmente a los pobres (21).

De acuerdo con Cozzens, *et al.* (23), se debe tener en cuenta que esta, al igual que cualquier otra actividad económica de alta tecnología, puede ayudar a lograr la competitividad internacional sin necesariamente distribuir beneficios en la sociedad local. Dependiendo del sistema de propiedad del *know how* en nanotecnología, los beneficios asociados pueden efectivamente favorecer una economía nacional, pero las industrias basadas en tecnologías emergentes tienden a generar pocos puestos de trabajos altamente cualificados, para los cuales pocas personas están preparadas en países de bajos o medianos ingresos, lo cual reduce el impacto de dichos nuevos puestos en las tasas de desempleo. Estos autores concluyen que, a menos que las industrias basadas en la nanotecnología resuelvan problemas que son importantes para los contextos nacionales con

sus propias especificidades, probablemente tenderán a concentrar los beneficios entre las élites.

Conclusiones

La complejidad de los problemas asociados a la producción, la disponibilidad, la calidad y el consumo de alimentos es enorme. Estas cuestiones son fundamentales para la mejora del bienestar y la prosperidad de todas las comunidades y, en particular, de las personas que viven en la pobreza. La nanotecnología como enfoque, puede proporcionar soluciones específicas y muy sofisticadas a problemas específicos, pero, infortunadamente, y como cualquier otra tecnología emergente, podría no estar totalmente exenta de crear otras nuevas. Para que la nanotecnología contribuya efectivamente a un sistema alimentario más sostenible, los proponentes, los innovadores y los reguladores de la nanotecnología aplicados al sector agroalimentario deben tener en cuenta todo el escenario y abordar los problemas adecuados. Esto implica que todas las partes interesadas trabajen bajo un enfoque multidisciplinario, desde agencias de financiación y responsables de la formulación de políticas hasta investigadores e innovadores.

El papel principal en el cambio de las malas perspectivas de la sostenibilidad del sector agroalimentario seguirá en manos de los actores de la política, la economía y la educación, más que en la de la nanotecnología en sí misma –o cualquier otra tecnología–. Sin embargo, no es hiperbólico esperar que, con la financiación estratégica, la investigación y la innovación adecuadas, las aplicaciones de las nanotecnologías puedan abordarse en la dirección de un sector agroalimentario más sostenible.

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICTA) de la Universidad Nacional de Colombia; a los profesores María Stella Cosío y Saverio Mannino de la Universidad de Milán, por sus enseñanzas en el área de la nanotecnología aplicada a alimentos; y al profesor Jhon Jairo Bejarano de la Universidad Nacional de Colombia, por su invitación a contribuir a la Sección Especial XVII Congreso Colombiano de Nutrición y Dietética y I Internacional e Interdisciplinario en Alimentación y Nutrición.

Conflictos de interés

El autor declara no tener ningún conflicto de interés en este artículo.

Referencias

1. Electronics.ca Research Network. Global Funding of Nanotechnologies; 2011. Fecha de consulta: 22/02/2017. Disponible en: <http://www.electronics.ca/presscenter/articles/1542/1/Annual-Global-Nanotechnology-Research-Funding-Running-at-10-Billion-Per-Year/Page1.html>.
2. Roco MC, Bainbridge WS. Societal implications of nanoscience and nanotechnology: Maximizing human benefit. *J Nanopart Res*. 2005;7:1-13.
3. National Nanotechnology Initiative. What is nanotechnology? 2006. Fecha de consulta: 22/02/2017. Disponible en: www.nano.gov/html/facts/whatsNano.html.
4. Dingman J. Nanotechnology: Its impact on food safety. *J Environ Health*. 2008;70:47-50.
5. Fendler JH. Self-assembled nanostructured materials. *Chem Mater*. 1996;8:1616-24.
6. Reibold M, Pätzke N, Levin AA, Kochmann W, Shakhverdova IP, Paufler P, et al. Structure of several historic blades at nanoscale. *Cryst Res Technol*. 2009;44:1139-46.
7. Ghosh SK, Pal T. Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: From theory to applications. *Chem Rev*. 2007;107:4797-862.
8. Haruta M. Catalysis: Gold rush. *Nature*. 2005;437:1098-9.
9. Kennedy LC, Bickford LR, Lewinski NA, Coughlin AJ, Hu Y, Day ES, et al. A new era for cancer treatment: Gold-nanoparticle-mediated thermal therapies. *Small*. 2011;7:169-83.
10. Zhong CJ, Luo J, Fang B, Wanjala BN, Njoki PN, Loukrakpam R, et al. Nanostructured catalysts in fuel cells. *Nanotechnology*. 2010;21:062001.
11. Pitkethly MJ. Nanomaterials—the driving force. *Mater Today*. 2004;7:20-9.
12. Tsuzuki T. Properties of nanoparticulate materials. En: Bawa R, Audette GF, Rubinstein I, editors. *Handbook of Clinical Nanomedicine: Nanoparticles, imaging, therapy, and clinical applications*. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 171-209.
13. Kuzma J, VerHage P. Nanotechnology in agriculture and food production: Anticipated applications. Project on Emerging Nanotechnologies; 2006. Fecha de consulta: 22/02/2017. Disponible en: http://www.nanotechproject.org/file_download/files/PEN4_AgFood.pdf
14. Rodrigues SM, Demokritou P, Dokoozlian N, Hendren CO, Karn B, Mauter MS, et al. Nanotechnology for sustainable food production: Promising opportunities and scientific challenges. *Environ Sci-Nano*. 2017;4:767-81.
15. Food And Agriculture Organization (FAO). The state of food insecurity in the world 2014: Strengthening the enabling environment for food security and nutrition. Rome: Food and Agriculture Organization; 2015.
16. McLean E, Cogswell M, Egli I, Wojdyla D, De Benoist B. Worldwide prevalence of anaemia, WHO vitamin and mineral nutrition information system, 1993-2005. *Public Health Nutr*. 2009;12:444.
17. Organización Mundial de la Salud (OMS). Nutrition topics: Controlling the global obesity epidemic. 2008. Fecha de consulta: 22/02/2017. Disponible en: <http://www.who.int/nutrition/topics/obesity/en/>
18. Torgerson PR, de Silva NR, Fevre EM, Kasuga F, Rokni MB, Zhou XN, et al. The global burden of foodborne parasitic diseases: An update. *Trends Parasitol*. 2014;30:20-6.
19. Gruère G, Narrod C, Abbott L. Agricultural, food, and water nanotechnologies for the poor. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute; 2011.
20. Kuhlmeier D, Sandetskaya N, Allelein S. Application of nanotechnology in miniaturized systems and its use in medical and food analysis. *Recent Pat Food Nutr Agric*. 2012;4:187-99.
21. Chaudhry Q, Castle L. Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries. *Trends Food Sci Tech*. 2011;22:595-603.
22. Lu J, Bowles M. How will nanotechnology affect agricultural supply chains. *Int Food Agribus Man*. 2013;16:21-42.
23. Cozzens S, Cortes R, Soumonni O, Woodson T. Nanotechnology and the millennium development goals: Water, energy, and agri-food. *J Nanopart Res*. 2013;15:2001.
24. Kumari A, Yadav SK. Nanotechnology in agri-food sector. *Crc Cr Rev Food Sci*. 2014;54:975-84.
25. Pérez-Esteve E, Bernardos A, Martínez-Mañez R, M Barat J. Nanotechnology in the development of novel functional foods or their package. An overview based in patent analysis. *Recent Pat Food Nutr Agric*. 2013;5:35-43.
26. Roco MC. Broader societal issues of nanotechnology. *J Nanopart Res*. 2003;5:181-9.
27. Kuzma J. Moving forward responsibly: Oversight for the nanotechnology-biology interface. *Journal of Nanoparticle Research* 2007; 9:165–182.
28. Huang Q, Yu H, Ru Q. Bioavailability and delivery of nutraceuticals using nanotechnology. *J Food Sci*. 2010;75:R50-7.
29. Evenson R E, Gollin D. Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*. 2003;300:758-62.
30. Townsend AR, Howarth RW, Bazzaz FA, Booth MS, Cleveland CC, Collinge SK, et al. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Front Ecol Environ*. 2003;1:240-6.
31. Lauterwasser C. Small sizes that matter: Opportunities and risks of nanotechnologies. Report in co-operation with the OECD International Futures Programme. Munchen: Allianz Center for Technology; 2006.
32. Wen LX, Li ZZ, Zou HK, Liu AQ, Chen JF. Controlled release of avermectin from porous hollow silica nanoparticles. *Pest Manag Sci*. 2005;61:583-90.

33. Liu Y, Yan L, Heiden P, Laks P. Use of nanoparticles for controlled release of biocides in solid wood. *J Appl Polym Sci.* 2001;79:458-65.
34. Lai F, Wissing SA, Müller RH, Fadda AM. *Artemisia arborescens* L essential oil-loaded solid lipid nanoparticles for potential agricultural application: Preparation and characterization. *AAPS Pharm Sci Tech.* 2006;7:E10-18.
35. Scrinis G, Lyons K. The emerging nano-corporate paradigm: Nanotechnology and the transformation of nature, food and agri-food systems. *Int J Sociol Food Agr.* 2007;15:22-44.
36. National Research Council (NRC). *Emerging technologies to benefit farmers in sub-Saharan Africa and South Asia.* National Academies Press; 2009.
37. DeRosa MC, Monreal C, Schnitzer M, Walsh R, Sultan Y. Nanotechnology in fertilizers. *Nat Nanotechnol.* 2010;5:91.
38. Karn B, Kuiken T, Otto M. Nanotechnology and in situ remediation: A review of the benefits and potential risks. *Environ Health Perspect.* 2009;117:1823-31.
39. Fuenmayor CA, Benedetti S, Pellicanò A, Cosio MS, Mannino S. Direct in situ determination of ascorbic acid in fruits by screen-printed carbon electrodes modified with nylon-6 nanofibers. *Electroanal.* 2014;26:704-10.
40. des Rieux A, Fievez V, Garinot M, Schneider YJ, Préat V. Nanoparticles as potential oral delivery systems of proteins and vaccines: A mechanistic approach. *J Control Release.* 2006;116:1-27.
41. Shi YH, Xu ZR, Feng JL, Wang CZ. Efficacy of modified montmorillonite nanocomposite to reduce the toxicity of aflatoxin in broiler chicks. *Anim Feed Sci Tech.* 2006;129:138-48.
42. Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, van Otterdijk R, Meybeck A. *Global food losses and food waste.* Rome: Food and Agriculture Organization; 2011.
43. Departamento Nacional de Planeación. *Pérdida y desperdicios de alimentos en Colombia. Estudio de la Dirección de Seguimiento y Evaluación de Políticas Públicas.* Bogotá: Departamento Nacional de Planeación; 2016.
44. Fabra MJ, Busolo MA, López-Rubio A, Lagaron JM. Nanostructured biolayers in food packaging. *Trends Food Sci Tech.* 2013;31:79-87.
45. Smolander M, Chaudhry Q. Nanotechnologies in food packaging. En: Chaudhry Q, Watkins R, Castle L, editors. *Nanotechnologies in Food.* Cambridge: Royal Society of Chemistry; 2010. p. 86-101.
46. Mascheroni E, Fuenmayor CA, Cosio MS, Di Silvestro G, Piergiovanni L, Mannino S, et al. Encapsulation of volatiles in nanofibrous polysaccharide membranes for humidity-triggered release. *Carbohydr Polym.* 2013;98:17-25.
47. Schalkhammer T. U.S. Patent No. 8,257,980. Washington, D.C.: U.S. Patent and Trademark Office; 2012
48. Han JH, editor. *Innovations in food packaging.* London: Academic Press; 2005. 600 p.
49. Tournas VH. Spoilage of vegetable crops by bacteria and fungi and related health hazards. *Crit Rev Microbiol.* 2005;31:33-44.
50. Weiss J, Takhistov P, McClements DJ. Functional materials in food nanotechnology. *J Food Sci.* 2006;71:R107-16.
51. The Telegraph. How supercows and nanotechnology will make ice cream healthy. Aug 21, 2005.
52. Gomes LM, Petito N, Costa VG, Falcão DQ, de Lima Araújo KG. Inclusion complexes of red bell pepper pigments with β -cyclodextrin: Preparation, characterisation and application as natural colorant in yogurt. *Food Chem.* 2014;148:428-36.
53. Chaudhry Q, Watkins R, Castle L. Nanotechnologies in the food arena: New opportunities, new questions, new concerns. En: Chaudhry Q, Watkins R, Castle L, editors. *Nanotechnologies in Food.* Cambridge: Royal Society of Chemistry; 2010. p. 1-7.
54. Rashidi L, Vasheghani-Farahani E, Soleimani M, Atashi A, Rostami K, Gangi F, et al. A cellular uptake and cytotoxicity properties study of gallic acid-loaded mesoporous silica nanoparticles on Caco-2 cells. *J Nanopart Res.* 2014;16:2285.
55. Bazo MA, Catalán IE, Ferrero CG, Navarro CJG, Garreta JMI, Hualde AR. U.S. Patent Application 13/809,089, 2011.
56. Feher J. U.S. Patent Application 12/939,395, 2010.
57. Fuenmayor CA, Lemma SM, Mannino S, Mimmo T, Scampicchio M. Filtration of apple juice by nylon nanofibrous membranes. *J Food Eng.* 2014;122:110-6.
58. Kim J, Grate JW, Wang P. Nanostructures for enzyme stabilization. *Chem Eng Sci.* 2006;61:1017-26.
59. Kumar V, Guleria P, Mehta SK. Nanosensors for food quality and safety assessment. *Environ Chem Lett.* 2017:1-13.
60. Elsaesser A, Howard CV. Toxicology of nanoparticles. *Adv Drug Deliver Rev.* 2012;64:129-37.
61. Brayner R, Ferrari-Iliou R, Brivois N, Djediat S, Benedetti MF, Fiévet F. Toxicological impact studies based on *Escherichia coli* bacteria in ultrafine ZnO nanoparticles colloidal medium. *Nano Lett.* 2006;6:866-70.
62. Sylvester DJ, Abbott KW, Marchant GE. Not again! Public perception, regulation, and nanotechnology. *Regul Gov.* 2009;3:165-85.