

International Journal of **Biological and Natural Sciences**

BENEFICIOS POTENCIALES DE LA NANOTECNOLOGÍA PARA UNA PRODUCCIÓN ANIMAL MÁS EFICIENTE

Bulmaro Méndez-Argüello

Facultad Maya de Estudios Agropecuarios-
Universidad Autónoma de Chiapas, (FMEA-
UNACH). Catazajá, Chiapas, México
ORCID: 0000-0002-6925-5461

Ricardo Hugo Lira-Saldivar

Departamento de Biociencias y
Agrotecnología. Centro de Investigación
en Química Aplicada (CIQA-CONACYT).
Saltillo, Coahuila, México
ORCID: 0000-0002-8045-2052

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: La nanotecnología (NT), considerada como un conjunto de técnicas que se orientan a la caracterización, elaboración y aplicación de materiales de dimensiones muy pequeñas, en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm). En el presente artículo se destacan las aplicaciones de la NT en medicina veterinaria, nutrición animal, se señalan la importancia en producción porcina y avícola. Se enfatiza que los minerales traza en forma de nanopartículas (NPs) pueden ser usados con mayor eficiencia en la nutrición de los animales. La aplicación de la NT en nutrición animal incluye modificaciones de ingredientes para mejorar el sabor, palatabilidad, color y textura; y aumentar la biodisponibilidad de los nutrientes. El uso de las nanopartículas (NPs) en medicina veterinaria tiene propiedades importantes para eliminar las barreras biológicas y aumentar la eficiencia de curación, debido a que pueden controlar el momento adecuado para la liberación de los fármacos; son una alternativa viable al uso de los antibióticos. La NT puede ayudar también a la integración de nano-técnicas como la bioimagen no invasiva de gametos, nanopurificación y protectores en criopreservación para optimizar y eliminar los obstáculos reproductivos.

Palabras clave: Nanopartículas, nutrición animal, medicina veterinaria, reproducción.

INTRODUCCION

En un intervalo de tiempo relativamente corto, la NT ha tenido un impacto significativo en numerosos sectores incluyendo la agroindustria. La NT, considerada como una tecnología emergente, se orienta a la caracterización, elaboración y aplicación de materiales de dimensiones muy pequeñas, en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm), o sea de 1 a 100 billonésimas de metro, por lo que se ubica dentro de la escala atómica y molecular (Younas et al., 2023).

Una ciencia nueva y con gran potencial para apoyar la investigación y el desarrollo tecnológico es la NT, que cada vez encuentra más aplicaciones en las ciencias de la vida comercial, principalmente en prácticas de producción ganadera, pesquera y agrícola. Acorde con Poddar y Kishore (2022), en el nuevo milenio se ha dado un gran enfoque a las prácticas sustentables, el manejo holístico de los animales de interés alimenticio, el manejo de su alimentación y las metodologías perfeccionadas de producción, las cuales son clave para generar ganancias comerciales y sostenibles a largo plazo.

El surgimiento de las aplicaciones nanotecnológicas en los sistemas de ganadería puede presentar nuevas soluciones innovadoras para superar retos sobre el manejo reproductivo de bovinos, caprinos y de otras especies. Muchos fármacos (hormonas, antibióticos, etc.), moléculas biológicas y nutrientes pueden adquirir nuevas propiedades fisicoquímicas cuando se aplican o dosifican como NPs. Las principales ventajas de los nanoprodutos en la ganadería son que su biodisponibilidad está mejorada, hay mayor captación celular, liberación sostenida y gradual, así como menor toxicidad en comparación con las formas convencionales de los productos veterinarios (Hashem y Gonzalez-Bulnes, 2021).

Varias aplicaciones de la NT comenzaron a encontrar su camino en el sector veterinario, ya que se encuentra aplicaciones cada vez más en la terapia animal, el diagnóstico, la producción de vacunas veterinarias, los desinfectantes, para la cría y reproducción animal, e incluso en el campo de la nutrición animal (El-Sayed y Kamel, 2020). El reemplazo de los antibióticos de uso común se refleja directamente en la salud pública. Al hacerlo, minimizan el problema de la resistencia a los medicamentos tanto en

medicina humana como veterinaria, y el problema de los residuos de medicamentos en la leche y la carne. Además, tienen un gran impacto económico, al minimizar las cantidades de leche desechada y el número de terneros de desecho en los rebaños lecheros. La NT también se ha aplicado para desarrollar productos para el cuidado de mascotas y artículos de higiene animal (Rawat et al., 2022).

USO DE NANOPARTÍCULAS DIVERSAS EN ANIMALES DE INTERÉS ALIMENTICIO

La NT mejora de manera importante la producción agropecuaria y promueve la agricultura sustentable mediante el reciclado de nutrientes. Los animales son una parte integral de nuestro ecosistema, facilitando el ciclo de nutrientes a través de la deposición de estiércol y orina. Así, por ejemplo, la orina de bovinos es bien conocida por sus propiedades germicidas, antibióticas, antimicrobianas y medicinales que han sido evidentes desde la antigüedad. La orina de vaca rica en nutrientes como nitrógeno, potasio y fósforo, es muy benéfica para enriquecer el suelo y se puede aplicar de manera directa o con formulaciones y también con aplicaciones indirectas (Devasena y Sangeetha, 2022).

La NT ha revolucionado prácticamente todas las disciplinas de la medicina veterinaria y la ciencia animal, ya que puede ofrecer nuevos dispositivos y materiales a pequeña escala que son beneficiosos para todos los organismos. Las NPs utilizadas para la detección de enfermedades de humanos y animales, el tratamiento, la administración de medicamentos, la cría de animales y la reproducción incluyen NPs como los puntos cuánticos, NPs magnéticas, nanoporos, NPs poliméricas, nanocáscaras, fullerenos, liposomas y dendrímeros. Si bien la NT se considera una de las principales

tecnologías ya aplicadas en diversas materias, su aplicación en la ciencia veterinaria aún está en sus etapas iniciales en comparación con otras disciplinas hermanas como la agronomía (Woldeamanuel et al., 2021).

El estudio realizado por Reda et al. (2021) analizó el uso de bionano zinc como aditivo en la nutrición alimentaria de codornices, así como su efecto sobre la actividad antimicrobiana y el crecimiento y microbiota intestinal, reporta que se observó una mejora significativa en la ganancia de peso corporal, el consumo de alimento y el índice de conversión alimenticia en las aves alimentadas con dietas suplementadas con 0.2 g/kg de NPsZn. La suplementación con dosis de 0.1-0.3 g/kg de dieta mostró un impacto positivo en la actividad de ALT, AST y LDH. Los parámetros del perfil hepático no fueron influenciados por el bionano zinc, con excepción del colesterol total, lipoproteínas de alta y baja densidad. Además, la suplementación dietética de NPsZn en concentraciones de 0.1–0.3 g/kg de dieta señaló un impacto positivo en la superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa, malondialdehído e inmunoglobulina.

Las NPs de óxido de zinc (NPsZnO) exhiben propiedades antimicrobianas, sin embargo, esas propiedades dependen de su tamaño y forma, lo que las hace específicas para diversas aplicaciones. Sin embargo, el tamaño y la forma deseados de las NPs se pueden obtener mediante el proceso de optimización de la síntesis mediada por microorganismos (Moos) mediante la manipulación de sus condiciones de reacción. Mohd et al. (2019) señalan que las NPsZnO se sintetizan mediante varios métodos químicos y físicos. Sin embargo, esas metodologías son costosas y no son amigables con el ambiente. Por esa razón, la biosíntesis de NPsZnO ha evolucionado rápidamente ya que los Moos son más limpios, ecológicos, no tóxicos y

biocompatibles como alternativas a la síntesis química y física. Además, el zinc en forma de NPs es más efectivo que sus contrapartes a granel y, por lo tanto, se han explorado para muchas aplicaciones potenciales, en la industria animal. Esto se debe a sus propiedades superiores para combatir un amplio espectro de patógenos. Además, el zinc es conocido como un oligoelemento esencial para muchas funciones biológicas en el cuerpo del animal, así como en las plantas (Natasha et al., 2022).

Las NPs, tienen aplicaciones en la terapia, nutrición y reproducción animal. El reemplazo de los antibióticos de uso común se refleja directamente en la salud pública. La NT también se ha aplicado para desarrollar productos para el cuidado de mascotas y artículos de higiene animal (Yildiz et al., 2022). Diversos minerales como la plata y la zeolita, también han sido usados en investigación histopatológica de tejidos hepáticos y renales en pollos de engorda alimentados con NPs de plata (NPsAg) recubiertas de zeolita.

Acorde con Tavakoli et al. (2020) la capacidad de las NPsAg para infiltrarse en los tejidos ha generado resistencia contra su eliminación en la sangre y ha provocado la agregación de partículas en los tejidos utilizables. Debido a los informes de los efectos peligrosos de las NPsAg, se considera necesario investigar histopatológicamente el hígado y el riñón de los pollos de engorda alimentados con NPsAg; además, en los últimos años se ha considerado usar NPsAg para aumentar el nivel de insulina de algunos animales diabéticos, lo que ha resultado en una disminución de la condición de hiperglucemia, debido a eso puede ser factible emplear estas NPs en el tratamiento de diabetes mellitus en animales (Torabian et al., 2022).

El sector agropecuario es la columna vertebral para la economía de los países en desarrollo. La creciente población mundial está ejerciendo más presión sobre este sector, por lo que existe la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías para abordar las crisis de seguridad alimentaria y escasez de alimentos. Khan et al. (2019) señalan que los sistemas agropecuarios han entrado en la nueva era en que la NT funciona como un avance tecnológico con respecto a la revolución del sector alimentario, ya que tiene aplicaciones prodigiosas en la producción, procesamiento, envasado y almacenamiento de alimentos.

La incorporación de materiales de relleno a nanoescala en una matriz polimérica ayudaría a aliviar los desafíos del material de empaque de alimentos, ya que mejora sus cualidades funcionales. El aumento de las propiedades de barrera, características térmicas como el punto de fusión y las temperaturas de transición vítrea, y las funcionalidades modificadas, como la humectabilidad de la superficie y la hidrofobicidad, son características de algunos polímeros que contienen NPs que también tienen el potencial de reducir el crecimiento de bacterias dentro de los empaques (Dash et al., 2022).

En nutrición animal existen algunos reportes que señalan cambios benéficos, al analizar los efectos de la suplementación con NPsZnO en la dieta de puercos o marranos, sobre el crecimiento, la morfología intestinal, la población de la microflora y la respuesta inmune en lechones destetados. En el estudio de Pei et al. (2019), se emplearon 150 lechones destetados (9.37 ± 0.48 kg) a los que les asignaron cinco tratamientos nutricionales y fueron alimentados con una dieta basal (control), o con la dieta suplementada mediante nano-ZnO en dosis de 150, 300 o 450 mg kg⁻¹ y 3000 mg kg⁻¹ ZnO durante 21 días. En comparación con el

control, los suplementos dietéticos de nano-ZnO y ZnO mejoraron la ganancia de peso diaria promedio, la ingesta diaria promedio de alimento; además, se incrementó la retención de zinc en suero, corazón, hígado, bazo y riñón de cerdos suplementados con nano-ZnO y ZnO. Esos resultados indican que dosis bajas de nano-ZnO pueden tener efectos benéficos sobre el crecimiento, la morfología intestinal, la microflora y la inmunidad en cerdos destetados. Estos efectos son similares a los reportados con las dosis farmacológicas de ZnO convencional. Por lo tanto, el nano-ZnOs puede reducir la excreción de minerales, lo que puede reducir los retos ambientales.

La singularidad del Zn es que, es el segundo oligoelemento más abundante en el cuerpo de los animales, pero no lo pueden almacenar, por lo que debe existir un suministro regular a través de la dieta. Investigaciones recientes señalan que las NPsZnO promueven el crecimiento de animales al ser empleadas como sustituto de antibióticos y del sulfato de zinc, además, aumentan la capacidad antioxidante, la inmunidad y la función de barrera intestinal en pollos de engorda, ya que pueden actuar como agentes antibacterianos, modulan el sistema inmunológico y tienen funciones específicas en la reproducción de los animales (Zhang et al., 2022). El nanozinc puede utilizarse en dosis más bajas con mejores resultados que las fuentes convencionales de Zn. No obstante, existe la necesidad de estudiar las dosis óptimas, la biodisponibilidad y el tiempo a suplementar, debido a que los minerales nanométricos tienen la capacidad de atravesar el intestino delgado más fácilmente y distribuirse más rápido en sangre, y órganos como cerebro, pulmón, corazón, riñón, bazo, hígado y estómago (Swain et al., 2016).

Las aplicaciones de la NT en ciencia animal son enormes, por ejemplo, incluye

nanoaditivos alimenticios para animales, medicamentos para ganado, nanoemulsiones antimicrobianas para tratamiento y prevención de enfermedades en animales de granja y nanocompuestos para envasado de alimentos (Ganjigohari et al., 2017). De igual manera tiene aplicaciones en todos los aspectos de nuestras vidas como por ejemplo en productos industriales, sistemas de suministro de fármacos, diagnóstico y tratamiento de enfermedades y nutrición animal (Zhao et al., 2017).

La ganadería es un componente importante de la economía en la mayoría de los países del mundo. Sin embargo, las enfermedades han sido un problema porque reducen significativamente el crecimiento de los animales, el rendimiento, la calidad de la carne, leche y huevo, por lo que se están buscando nuevas técnicas de diagnósticos para identificar y tratar estrictamente las enfermedades de los animales. La NT puede aumentar la eficiencia en el diagnóstico y tratamiento e incrementar la producción de proteína animal para la toda la población mundial (Sahoo et al., 2014).

En la nutrición, los nanoaditivos en las dietas promueven el crecimiento, salud de los animales y calidad de la carne; los nanoacarreadores de medicamentos en medicina veterinaria es otra aplicación de la NT. Los nanomateriales (NMs) en nutrición animal y medicina veterinaria apenas están investigándose, sin embargo, su aplicación ha ido en aumento, y se prevé que siga creciendo en el futuro. Las NPs han empezado a utilizarse para el suministro eficiente de nutrientes y como antimicrobianos de nueva generación. Minerales como el selenio, cobre, fierro y zinc de tamaño nanométrico incorporados a las dietas, pueden incrementar su absorción y bioutilización, de tal manera que pueden promover el crecimiento de los animales y mejorar la calidad de la carne (Hill

y Li, 2017). Con base a lo antes señalado, el objetivo del presente trabajo es poner a la disposición del lector, información reciente sobre las aplicaciones de la NT en la moderna producción ganadera.

NANOPARTÍCULAS Y SU IMPORTANCIA EN LA NUTRICIÓN ANIMAL

La NT es un conjunto de técnicas innovadoras y en evolución que tiene un enorme potencial para la revolución global del sector animal, ya que ofrece muchas oportunidades para los veterinarios, incluyendo el diagnóstico, la ingeniería de tejidos, la fabricación de vacunas y desinfectantes modernos (Osama et al., 2020). Las nanoaplicaciones ya se están usando en la salud y producción animal, así como en la cría, reproducción y nutrición animal.

El selenio (Se), uno de los nutrientes indispensables tanto para la salud humana como para el crecimiento animal, ya que participa en diversas funciones fisiológicas, como la respuesta antioxidante e inmunitaria y el metabolismo. La función del Se en la dieta, en sus formas orgánica e inorgánica, ha sido bien documentado en animales domésticos (Pecoraro et al., 2022). Además, se han desarrollado muchas estrategias de alimentación en diferentes animales para aumentar la concentración de Se en la producción y para abordar su deficiencia, e incluso como una estrategia nutricional para tratar enfermedades asociadas con los radicales libres. Sin embargo, los estudios sobre la dosis óptima de NPsSe en el alimento de animales de granja, las consecuencias a largo plazo de su uso, el mecanismo de transformación *in vivo* de las NPsSe y sus efectos nutricionales y en el ambiente son requeridos con urgencia (Gu y Gao, 2022).

La capacidad del intestino animal para absorber los oligoelementos y otros nutrientes mejora el crecimiento de los animales.

Las NPsSe promueven el crecimiento en conejos y pueden actuar como antioxidantes y agentes antibacterianos, mejorando su sistema inmunológico. El Se es uno de los factores nutricionales críticos necesarios para el funcionamiento normal del sistema inmunitario, el mantenimiento de la salud intestinal, así como en el crecimiento y las funciones de los órganos. Kassim et al. (2022) consignan que una deficiencia de Se podría provocar graves trastornos en el crecimiento de los animales, la digestión, el daño hepático, la fibrosis pancreática, los ovarios quísticos y la disfunción del metabolismo de la tiroides. Además, la suplementación suficiente de Se en conejos tiende a mantener una buena salud y un buen desempeño productivo. Pero debido a que existen posibilidades casi ilimitadas con respecto a la dosificación de Se, aún se necesita mucha más investigación con NPsSe (Tsuji y Hatfield, (2022).

En épocas recientes existe un enorme aumento en la demanda de alimentos de origen animal, debido al incremento relacionado con la población humana. La cantidad y calidad de los alimentos de origen animal dependen principalmente de la salud y el bienestar del ganado. Los elementos minerales de la dieta son bien conocidos por desempeñar un papel esencial en el mantenimiento de la nutrición del ganado. Sin embargo, la escasa biodisponibilidad de los elementos minerales administrados provoca desnutrición y problemas de salud en los animales. Debido a esa situación la alimentación con NPs metálicas de Zn, Se, Ag, etc., para el ganado, ha mostrado resultados prometedores, incluido un mayor crecimiento, inmunidad, capacidad de reproducción y mejor calidad de los productos animales (Bhagat and Singh, 2022).

La bionanotecnología ha introducido una perspectiva completamente nueva

sobre el uso del Se en la nutrición animal. Recientemente la atención se ha centrado en las NPsSe. La presión social dirige la investigación sobre estas y otras NPs para ser sintetizadas mediante una “vía verde” que es más ecológica. Las bio NPsSe representan una nueva posibilidad para el uso de esta nueva forma de Se en la nutrición animal. Malyugina et al. (2021) revelan que investigaciones recientes sobre NPsSe biogénicas, han determinado que tienen baja toxicidad, mejoran el estado antioxidante y aumentan la respuesta inmune del cuerpo de animales de granja. Sin embargo, sus beneficios pueden ser mucho mayores, como lo han demostrado numerosos estudios *in vitro*. Además, las NPsSe biogénicas poseen actividades antimicrobianas, antifúngicas y anticancerígenas.

En referencia a las NPs de Se y Zn, Abdelnour et al. (2021) realizaron un estudio para analizar métodos de fabricación, beneficios, peligros y sus aplicaciones en rumiantes. Sus resultados indican que las NPs pueden contribuir a la sostenibilidad del sector ganadero mejorando la producción cuantitativa y cualitativa de productos animales seguros, saludables y funcionales. Dadas las diversas aplicaciones de la NT en la nutrición animal, la administración de NPs puede mejorar mucho la biodisponibilidad de los minerales aumentando su absorción celular y evitando el antagonismo mineral. Diversos NMs también son útiles para mejorar el rendimiento reproductivo y las tecnologías de reproducción animal. A pesar de los prometedores efectos positivos de los NMs en el rendimiento animal (crecimiento, utilización de alimentos, biodisponibilidad de nutrientes, estado antioxidante y respuesta inmunitaria), existen varios desafíos relacionados con los nanominerales, incluido su metabolismo y destino en el cuerpo del animal. Por lo tanto,

las implicaciones económicas, legales y éticas de los NMs también deben ser consideradas por las autoridades de salud (Srivastava, 2023).

La adición moderada de Se en la dieta puede incrementar la capacidad antioxidante y regula la función inmunológica y promueve el crecimiento de los animales. Gulyás et al. (2017) demostraron que el nanoselenio incorporado en la dieta de pollos de engorda tiene mayor biodisponibilidad y menor toxicidad en comparación con otras formas de selenio utilizados. La tasa de utilización de los nanonutrientes es mucho mayor que la de los elementos de tamaño micrométrico. La investigación ha demostrado que el coeficiente de utilización de los oligoelementos inorgánicos es de alrededor del 30%, mientras que el coeficiente de utilización de los nanoelementos es cercano al 100% (Huang et al., 2015).

Hay algunos trabajos que se han realizado sobre la curcumina (proveniente de la planta de jengibre) y las NPs de curcumina como fármacos en nutrición animal. Sin embargo, los estudios han demostrado que la ingestión de curcumina o NPs de curcumina no beneficia mucho la salud de los animales debido a su menor biodisponibilidad, lo que puede resultar debido a la baja absorción, el rápido metabolismo y veloz eliminación de la curcumina del cuerpo animal. Por estas razones, se necesitan formulaciones avanzadas de curcumina. Moniruzzaman y Min (2020), reportan que las nanoesferas de curcumina son un campo recientemente de la nanobiotecnología que puede tener efectos beneficiosos en términos de aumentar el crecimiento, de su actividad antimicrobial, antiinflamatoria y neuroprotectora en la salud de animales monogástricos y peces, por medio de formas de nanoesferas que son biodegradables y biocompatibles.

Los minerales son importantes para el crecimiento y productividad de los animales. Los minerales traza en forma de NPs pueden ser usadas con mayor eficiencia en la nutrición (Sahoo et al., 2014). Las aplicaciones de la NT pueden ayudar a obtener información precisa acerca de la ubicación de un nutriente en los tejidos, células o compartimentos celulares. La detección ultrasensible de nutrientes y metabolitos aumenta la comprensión de la función de los nutrientes y sus interacciones biomoleculares con tejidos específicos.

Al balancear dietas completas deben incorporarse vitaminas y sus precursores, sin embargo, varias de estas son insolubles en agua, pero cuando se formulan como NPs, dichas sustancias pueden mezclarse fácilmente con el agua, lo que aumenta su biodisponibilidad (Sheikh et al., 2016). Estas tecnologías tienen el potencial de mejorar la nutrición animal e incrementar la biodisponibilidad de los nutrientes en los tejidos (Thulasi et al., 2013). El uso de la NT en nutrición animal incluye modificar

algunos ingredientes para mejorar el sabor, palatabilidad, color y textura; aumentando así la biodisponibilidad de los elementos esenciales (Figura 1).

En los últimos años, muchas estrategias se han utilizado para disminuir la suplementación mineral en los animales de granja, principalmente en pollos de engorda. La aplicación de la NT es una estrategia que permite incrementar significativamente la biodisponibilidad de los minerales, como el calcio. Los nanominerales tienen mayor área superficial y de contacto, lo que podría dar lugar a un aumento en su absorción y utilización (Ganjigohari et al., 2017). Los estudios han demostrado que las NPs son estables en altas temperaturas, y podrían ser absorbidas fácilmente en el tracto digestivo de los animales; Por lo tanto, los minerales de tamaño nano son más eficaces a niveles más bajos que sus formas convencionales, lo que contribuiría a utilizar solo las cantidades necesarias, reduciendo los desperdicios. Las investigaciones muestran que, debido

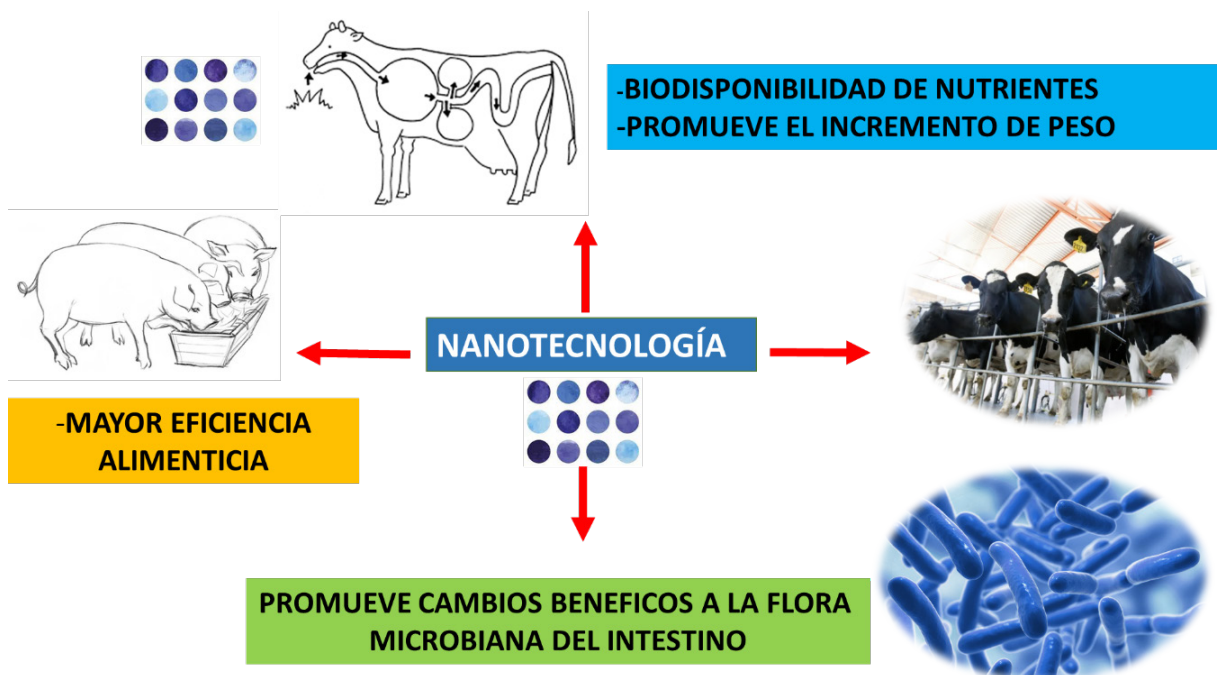


Figura 1. Aplicaciones potenciales de la nanotecnología en la nutrición animal.

a su pequeño tamaño y propiedades físicas únicas, las NPs podrían tener una mejor biodisponibilidad e interacción con otros componentes de la alimentación, mejorando así el crecimiento y producción de los animales (Swain et al., 2015).

En el procesamiento y preservación de alimentos, la NT tiene muchas aplicaciones. Los componentes básicos de los alimentos como proteínas, grasas, carbohidratos están empezando a ser importantes en la nanoingeniería. Las NPs son muy útiles como vehículo para el suministro de ingredientes funcionales y proporciona valor agregado a productos alimenticios, por ejemplo, los lácteos formulados con nutrientes nanoencapsulados influyen en la textura, sabor y calidad nutricional, esto resulta ser importante para alimentos de los animales recién destetados (cerdos y becerros) que requieren una dieta especial para adaptarse a una dieta sólida donde se incorporen cereales como sorgo, trigo o maíz (Chavada, 2016).

Los resultados de Gonzales-Eguia et al. (2009) revelan que el nanocobre podría mejorar la digestión de la energía y la grasa mediante el aumento de la lipasa y la actividad de la fosfolipasa A en el intestino delgado, en comparación con una dieta suplementada con sulfato de cobre (CuSO_4). Los lechones experimentaron un aumento en la ganancia diaria de peso, así como en el incremento de su capacidad inmune. El análisis de la influencia del nanocobre en el sistema inmunológico mostró mayores concentraciones de globulina total y superóxido dismutasa en el suero sanguíneo. Estos resultados sugieren que el valor nutritivo de los alimentos para animales domésticos puede mejorarse significativamente con la adición de NPs metálicas.

El uso de nano cápsulas para el recubrimiento y la protección de algunas enzimas y proteínas particulares sería eficaz

para usarse en la dieta animal con la finalidad de aumentar el crecimiento y rendimiento (Gangadoo et al., 2016). El cobre se agrega regularmente a los alimentos por su capacidad para promover el crecimiento y el rendimiento de los animales, además de sus propiedades antimicrobianas. Se ha reportado que las NPs_{Cu} pasan la mucosa intestinal más fácilmente que las micropartículas, resultando en una mejor absorción (El Basuini et al., 2017).

Por su parte, Mohammadi et al. (2017) estudiaron los efectos de las NPs de óxido de hierro recubiertas con L-cisteína en el rendimiento reproductivo de codornices. Los resultados indicaron que la fertilidad de los animales fue mejorada por las NPs adicionadas a la dieta, observándose mayor peso de los pollitos. Los resultados de este estudio mostraron que las NPs mejoran la biodisponibilidad y la utilización del hierro en la dieta, lo que incrementa la producción y calidad de huevo y la conversión alimenticia. Yang et al. (2014) adicionaron a la dieta de gallinas ponedoras la nanovitamina D3 y la vitamina D3 comúnmente utilizada. Sus resultados muestran que, bajo las mismas condiciones de alimentación, la producción y calidad del huevo fueron mejores con la nanovitamina.

Un problema presente en nutrición de animales es la contaminación de alimentos por hongos que provoca muchas pérdidas y serios problemas de salud. Las aflatoxinas son una clase de micotoxinas producidas por hongos del género *Aspergillus* (*A. flavus* y *A. parasiticus*), los cuales son contaminantes de los ingredientes de los alimentos utilizados en dietas de pollos. Cuando estas aflatoxinas entran en el tracto digestivo del animal causan una variedad de efectos, como una baja tasa de crecimiento, daño hepático, disminución de las proteínas séricas y bajo rendimiento (Shannon et al., 2017). Debido a esto, las

aplicaciones de la NT nos han beneficiado con la fabricación de nanosensores y nanocompuestos para detectar y reducir el crecimiento de las aflatoxinas en alimentos (Taj et al., 2022). Un nanocompuesto de MgO-SiO₂ fue utilizado como agente adsorbente eficaz para la eliminación de aflatoxinas en harina de trigo empleada en dietas de animales; similarmente, se ha utilizado nanocompuestos de zeolita para reducir la presencia de aflatoxinas en alimentos de pollos de engorda e incrementar la calidad de la carne (Shabani et al., 2016).

APLICACIONES DE LAS NANOPARTÍCULAS EN MEDICINA VETERINARIA

El reporte de Rahman et al. (2022) señala que la NT es una herramienta moderna y bien desarrollada, que tiene gran importancia en muchos campos de la medicina (diagnóstico y tratamiento). Además, puede ayudar a prevenir y solucionar muchos problemas relacionados con la medicina veterinaria, ya que apoya la producción y la salud animal. Los nanosistemas incluyen NPs metálicas, liposomas, nanoesferas poliméricas, micelas poliméricas, nanotubos de carbono, fullerenos funcionalizados, nanocristales recubiertos de polímeros, dendrímeros y nanocapas.

En los últimos años, se han explorado varios sistemas de administración de fármacos basados en nanotransportadores, como NPs poliméricas, NPs lipídicas sólidas, NPs metálicas, liposomas y otros, para atacar y tratar una amplia variedad de enfermedades. Su empleo ha traído muchos beneficios, no solo a la medicina humana sino también a la medicina veterinaria, aunque a un ritmo más lento. Pronto, el uso de nanotransportadores podría revolucionar el sector de la salud animal y, como resultado, muchas terapias

veterinarias serán más efectivas (Sapino et al., 2022).

El uso de NPs en medicina veterinaria tiene propiedades importantes para eliminar las barreras biológicas y aumentar la eficiencia de curación. Las NPs promueven la efectividad de los medicamentos debido a que se controla el momento adecuado para la liberación de los fármacos. Las NPs pueden presentar una alternativa viable a los antibióticos y pueden ayudar a evitar que los patógenos provoquen daños a los animales y se reduzca la producción de carne, leche y derivados (Hill y Li, 2017). Las NPs metálicas con cargas positivas provocan daños a las membranas bacterianas cargadas negativamente, dando lugar a filtración y lisis bacteriana (Gahlawat et al., 2016). El trabajo de Mohamed et al. (2017) permitió descubrir que las NPs_{Ag} podrían inhibir el crecimiento de *Corynebacterium pseudotuberculosis*. Se debe tener presente que la plata se utiliza en medicina para prevenir infecciones y eliminar o inhibir el crecimiento de ciertos microorganismos patógenos.

En animales rumiantes como las ovejas los péptidos funcionalizados con ciertas NPs inertes estimulan respuestas inmunes en las células (Greenwood et al., 2008). Por otra parte, ha sido señalado que los nanotubos de carbón (NTC) pueden ayudar a eliminar cal (óxido de calcio), ya que al ser introducidos en el torrente sanguíneo se concentran alrededor del tumor o daño presente y cuando se expone el animal a la luz infrarroja, los NTC absorben ligeramente la energía emitida calentándose hasta los 55°C, destruyendo así el tumor sin dañar a otros tejidos (Coppo, 2009). El uso de NTC dentro de la piel de los animales muestra el pico del estro y la concentración de los estrógenos en tiempo real, lo que permite hacer la inseminación artificial con mayor eficacia y en el momento exacto (Mousavi y Rezaei, 2011).

El desarrollo de vacunas en medicina veterinaria tiene como objetivo principal mejorar la salud y el bienestar general de las especies animales y existe una necesidad de conseguir que las vacunas se administren a través de la mucosa respiratoria para reducir costos y disminuir las dosis, obteniendo una estimulación inmune similar o mayor respecto a las aplicaciones tradicionales. Sin embargo, la vía respiratoria a menudo presenta desafíos en la eficacia de la liberación del antígeno para inducir inmunidad. En este sentido Calderón-Nieva et al. (2017) reportan que las NPs mejoran la activación inmune al producir mayor cantidad de anticuerpos. Aunque todavía se están investigando mecanismos específicos entre NPs y las membranas biológicas, ha sido señalado que el tamaño y la forma de las NPs, así como la distribución influyen en la protección y liberación de antígenos al sitio específico

La aplicación y eficacia de los antibióticos puede ser mejorada utilizando a las NPs como portadoras o acarreadoras, lo que podría reducir la dosis utilizada para tratar ciertas infecciones. Las NPs que se dirigen a las bacterias Gram negativas son las más importantes en producción animal, ya que los patógenos bacterianos presentes en el alimento y tracto digestivo de los animales causantes de múltiples enfermedades son predominantemente Gram negativos (Smekalova et al., 2017). Las NPs funcionalizadas con anticuerpos monoclonales pueden ayudar a detectar rápida y específicamente ciertos virus. Estas NPs pueden proporcionar una detección directa y rápida de virus, respecto a las técnicas tradicionales de detección. En algunos estudios, las NPs ya han demostrado una eficacia notable para dirigir el suministro de analgésicos, agentes antimicrobianos y antiinflamatorios (Xing et al., 2016).

La ingeniería de materiales nanoestructuradas, incluyendo NPs y nanoemulsiones, es muy prometedora para el desarrollo de nuevos agentes inmunomoduladores, ya que esas nanoestructuras pueden ser usadas para manipular más eficazmente o liberar componentes inmunológicamente activos a sitios específicos. Las aplicaciones exitosas de la NT en el campo de la inmunología permitirán una nueva generación de vacunas y fármacos inmunomoduladores, los cuales tienen como objetivo mejorar los resultados clínicos en respuesta a una serie de enfermedades infecciosas y no infecciosas (Smith et al., 2013). También se ha realizado una amplia investigación para desarrollar sistemas de diagnóstico con NPs. El objetivo es que las NPs puedan formar agregados con células atípicas dentro de un organismo, logrando así la detección temprana de patógenos o enfermedades con imágenes de alta resolución (Underwood y Van Eps, 2012).

APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA INDUSTRIA PORCINA Y AVÍCOLA

Los microelementos como Se y Zn son minerales esenciales para los animales y deben estar presentes en sus dietas, porque previenen la diarrea y la muerte de los cerdos destetados, además promueven el crecimiento de los animales en etapa de engorda (Calvo et al., 2017). El destete de los lechones es crítico debido a que los animales tienen una inmadurez fisiológica e inmunológica que se asocia con un aumento de la susceptibilidad a las infecciones y las enfermedades, especialmente la diarrea, y bajas tasas de crecimiento. Por lo tanto, el uso de aditivos en los alimentos se ha convertido en una práctica común para modular el sistema inmunológico y la microbiota intestinal, promoviendo así

la salud, el crecimiento y rendimiento de los cerdos durante la etapa posdestete. Al respecto Milani et al. (2017) señalan que las NPsZnO mejoran la digestibilidad de la dieta, incrementan la ganancia diaria de peso y previenen la presencia de diarrea, debido a que evitan que las bacterias como *E. coli* se adhieran en la mucosa intestinal.

El zinc contribuye a un mejor crecimiento de los animales debido a que previene la presencia de diarrea después del destete, causa beneficios en la función y morfología intestinal e incrementa la capacidad antioxidante en lechones destetados (Zhu et al., 2017). Al realizar un estudio con cerdos destetados, Wang et al. (2017) evaluaron durante 14 días el efecto de la adición de 1200 mg/kg de NPsZnO en el crecimiento, concentración de Zn en suero sanguíneo y cambios en la morfología intestinal. Los resultados indican que las NPsZnO de 30 nm aumentaron la ganancia diaria de peso y el peso final de los animales. Además, la suplementación de NPsZnO aumentó las concentraciones de Zn en el plasma sanguíneo, hígado y huesos; la morfología intestinal también se vio favorecida, ya que se observó un aumento en la longitud de vellosidades. Estos resultados sugieren que las NPsZnO podrían ser un buen elemento dietético de alto desempeño en lechones destetados.

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) es un gas tóxico y corrosivo que se produce como parte de diversos procesos en las industrias petroleras y químicas, así como en producciones ganaderas, principalmente porcinas. La descomposición bacteriana de los aminoácidos azufrados de la excreta animal da como resultado la formación de H_2S que luego se libera a la atmósfera durante las actividades de manejo del estiércol y esto es preocupante porque tiene efectos adversos en la salud humana y animal. Ciertas NPs

pueden eliminar o reducir las concentraciones de este gas. A nivel laboratorio, Awume et al. (2017) demostraron que las NPsZnO mezcladas con estiércol de cerdos eliminan el sulfuro de hidrógeno emitido por estos desechos animales.

Los científicos están trabajando en el uso de NPs para evaluar sus funciones como aditivos en la nutrición de pollos de engorda. Algunas NPs metálicas (plata, selenio y óxido de zinc) se están investigando como opciones para sustituir a los antibióticos comúnmente usados en la promoción del crecimiento en pollos de engorda y otros animales de interés económico, habiéndose reportado resultados alentadores. En un estudio que duró 35 días, se investigaron los efectos de la suplementación con 40 y 80 mg/kg de alimento de NPsZnO sobre la estructura microscópica del intestino delgado en pollos de engorda. Los efectos mostraron un aumento del crecimiento de las vellosidades en todas las partes del intestino delgado. La longitud, ancho, área y el número total de nódulos linfáticos de las amígdalas cecales fueron mayores en pollos que consumieron alimento con esas NPs. Las aplicaciones de NPsZnO pueden ayudar a disminuir el uso de antibióticos y mejorar la morfología epitelial intestinal, promoviendo mayor absorción y digestión de los nutrientes proporcionados en la dieta (Ali et al., 2017).

El cromo (Cr) es un oligoelemento esencial para los seres humanos y animales, ya que es un componente del factor de tolerancia a la glucosa y es vital en el metabolismo de los carbohidratos, las grasas y las proteínas, porque posiblemente incrementa la acción de la insulina. En nutrición porcina promueve el crecimiento de los animales, mejora la calidad de la canal y también tiene importancia en la reproducción. Li et al. (2007) señalan que la suplementación de nano cromo (200 $\mu\text{g}/\text{kg}$) en cerdos con pesos mayores a 76 kg aumentó

el consumo de alimento y la ganancia diaria promedio, también exhiben un aumento en la concentración de cromo en suero sanguíneo y en músculo, reduciendo el espesor de la grasa de la espalda, esto sugiere que el nanocromo aumenta su biodisponibilidad y la capacidad de absorción. Sin embargo, Genchi et al. (2021) ha reportado una doble acción de este metal, ya que, por un lado, es un elemento básico en la alimentación de humanos y animales, pero, por otro lado, el Cr induce efectos epigenéticos sobre el ADN y el microARN. Su toxicidad parece estar relacionada con su mayor movilidad en el suelo y una penetración más rápida a través de las membranas celulares.

La suplementación de Se en pollos se ha practicado para mejorar el sistema de defensa antioxidante e incrementar el crecimiento, sin embargo, tiene limitaciones, por lo que una forma alternativa es el nanoselenio que tiene mayor potencial como aditivo alimentario ya que posee mayor biodisponibilidad, más margen de seguridad y menor toxicidad, lo que origina una mayor calidad de la carne (Visha et al., 2017). Por otro lado, las NPs_{Ag} son conocidas por sus propiedades físicas, químicas y biológicas, habiéndose empleadas como antimicrobianos, aunque recientemente se están descubriendo otras aplicaciones. La adición de 15 µg/huevo de NPs_{Ag} realizada a los 18 días de incubación proporciona beneficios, debido a que modula la respuesta inmune post-incubación sin afectar la incubabilidad, crecimiento y otros parámetros de rendimiento de los pollos de engorda (Goel et al., 2017).

El excesivo daño celular resultante de la oxidación puede ser la razón de la pérdida de calidad en la carne de pollos de engorda. El nanoselenio puede ser utilizado para mejorar la actividad de las enzimas antioxidantes. Las aves suplementadas con 0.1875 mg/kg de alimento de nanoselenio

mostraron un aumento en la actividad de superóxido dismutasa y glutathion peroxidasa. Concluyendo que el nanoselenio mejora la actividad de las enzimas antioxidantes y genera mayor resistencia a la oxidación en pollos de engorda (Aparna y Karunakaran, 2016).

APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA REPRODUCCIÓN ANIMAL

Algunas NPs han demostrado mejorar la fertilidad y proteger a los espermatozoides en los animales. Los principales hallazgos en la investigación de Klein et al. (2023) sugieren que las NPs pueden llegar a los testículos en pequeñas cantidades donde persisten durante varios meses, e independientemente de la ruta de exposición tienen una toxicidad baja para los testículos, pero hay indicios de que algunas podrían actuar como disruptores endocrinos y señalan que el impacto sobre la espermatogénesis en adultos es generalmente débil y reversible, pero existen excepciones que merecen una mayor atención.

Durante las últimas décadas, se ha realizado mucha investigación sobre los efectos reproductivos de los oligoelementos esenciales. La hipótesis de investigación sobre las alteraciones en el metabolismo de los oligoelementos son una de las muchas causas de la infertilidad. Maciejewski et al. (2022) mencionan que una vez absorbidas, las NPs se transportan a varios órganos a través de la sangre o la linfa. Las NPs absorbidas, gracias a la reactividad ultra alta en comparación con los materiales a granel en tamaño microescala, alteran la homeostasis del cuerpo como resultado de la interacción con moléculas biológicas como el ADN, los lípidos y las proteínas; además, pueden interferir con el funcionamiento de las células, órganos y sistemas fisiológicos, lo que conduce a graves disfunciones patológicas.

Szudrowicz, et al. (2022) estudiaron el efecto a corto plazo de NPsAg recubiertas con polyvinylpyrrolidone (PvP) en peces cebra (*Danio rerio*) sexualmente maduros, lo cuales fueron expuestos durante siete días a iones de plata (0.01 mg/dm³) o NPsAg (0.01; 0.05; 0.1; 0.5; 1.0 mg/dm³). El último día, el hígado, los testículos y los ovarios se sometieron a un análisis histológico, el cual mostró que las NPsAg y los iones de plata provocan un aumento del área de los hepatocitos. El mayor índice de proliferación de hepatocitos se encontró en el grupo que recibió NPsAg en dosis de 0.05 mg/dm³. Además, se descubrió que las NPsAg interfieren con la espermatogénesis y la ovogénesis, pero también reducen los niveles de expresión de los genes *cat*, *gpx1a* y *sod1* en el hígado, en comparación con el grupo del tratamiento control. Con base en esos resultados, se concluyó que la exposición a NPsAg provoca cambios citotóxicos en el pez cebra, activa el sistema inmunológico, afecta negativamente el proceso de meiosis en las gónadas y genera estrés oxidativo.

El calcio (Ca) es un factor regulador esencial en una variedad de funciones biológicas, incluida la reproducción. Este mineral se requiere para diferentes actividades fisiológicas en los espermatozoides, incluida la espermatogénesis, la motilidad de los espermatozoides, la respuesta del acrosoma y la fertilización. La investigación de Hamada et al. (2021) examinó la influencia de la deficiencia de Ca y la administración de Ca utilizando Nano y calcio comercial en dos dosis para cada tipo de Ca (1000 mg/kg de peso corporal (PC) y 500 mg/kg de PC una vez al día durante 64 días por vía oral). Los resultados revelaron que los niveles séricos de Ca, testosterona y ABP, el recuento de espermatozoides, la motilidad y el porcentaje de acrosomas intactos, así como las enzimas antioxidantes testiculares,

fueron más bajos en el grupo de dieta libre de Ca, mientras que las anomalías espermáticas y el malondialdehído testicular fueron más bajos en el grupo de dieta libre de Ca. En ratas macho a las que se administró Ca (nano y comercial), los niveles séricos de Ca, testosterona y ABP, el recuento de espermatozoides, la motilidad, el porcentaje de acrosomas intactos y las enzimas antioxidantes testiculares aumentaron, mientras que las anomalías espermáticas y el malondialdehído testicular disminuyeron drásticamente. Estos resultados respaldan un fuerte vínculo entre el Ca, la función espermática y la fertilidad, por lo que la suplementación con Ca, en particular con NPs, podría mejorar de manera eficiente la función reproductiva masculina y la fertilidad.

La inseminación artificial es importante en la reproducción animal debido a que tiene menor riesgo para los animales y los productores porque se aseguran más becerros al destete, sin embargo, las técnicas de conteo, movilidad y selección de espermatozoides necesitan mejorarse. La NT puede ayudar para este fin mediante la integración de nanotécnicas como la bioimagen no invasiva de gametos, nanopurificación y protectores en criopreservación para optimizar y eliminar los obstáculos reproductivos (Liu et al., 2019). Las NPs se han examinado como un método para entender mejor el comportamiento de los espermatozoides y ovocitos de mamíferos. Algunas NPs inorgánicas son de interés para la reproducción, ya que son biocompatibles, fotoestables y tienen una mayor intensidad de señal que las moléculas fluorescentes orgánicas utilizadas tradicionalmente en microscopia y proporcionan un nuevo medio para visualizar los eventos moleculares y celulares durante la fertilización, de manera similar a las proteínas fluorescentes (Feugang et al., 2015).

La crioconservación de los espermatozoides se puede mejorar mediante el uso de aditivos nano-protectores, estos funcionan como buffers, pueden proporcionar a los espermatozoides nutrientes necesarios para un almacenamiento prolongado. Sirven para proteger y se pueden usar para liberar antibióticos y evitar que el crecimiento bacteriano afecte la calidad del espermatozoides e infecte a las hembras inseminadas (Bryla y Trzcinska, 2015). Los nanosensores se están estudiando para entender las causas de aborto en los animales. Por otra parte, los nanoantioxidantes como el zinc son utilizados para evitar la retención de la placenta y otros problemas reproductivos después del parto y para mejorar los problemas de infertilidad. El zinc tiene propiedades antioxidantes y desempeña un papel importante en la depuración de especies de oxígeno reactivo. La ausencia de Zn puede causar un aumento del daño oxidativo que puede contribuir a la mala calidad de los espermatozoides (Swain et al., 2016).

CONCLUSIONES

Las aplicaciones de la NT en medicina veterinaria y producción animal son enormes. Ante la urgente necesidad de producir más alimentos para una población en rápido crecimiento la NT abre excelentes posibilidades; por ejemplo, los minerales necesarios en la dieta de los animales pueden ser más eficientes con el uso de NPs ya que pueden mejorar el sabor, palatabilidad, color y textura; y aumentar la biodisponibilidad de los nutrientes. En medicina veterinaria puede aumentar la eficacia de curación controlando la liberación de los fármacos; además, la NT puede hacer más exitosa la reproducción animal como la inseminación artificial. Queda claro que la NT es una poderosa herramienta tecnológica de muy rápida evolución de la ingeniería que nos permite interactuar al

nivel molecular para explorar, gestionar y aplicar materiales metálicos o derivados del carbono con dimensiones nanométricas. La NT ha abierto nuevas aplicaciones en biotecnología y biología molecular, ya que ha revolucionado las disciplinas veterinarias y zootecnia, específicamente en los países desarrollados, proporcionando información detallada y mostrando lo que está pasando dentro del cuerpo más profundo de un organismo.

REFERENCIAS

- Abdelnour, S.A., Alagawany, M., Hashem, N.M., Farag, M.R., Alghamdi, E.S., Hassan, F.U. and Attia, Y.A. (2021). Nanominerals: fabrication methods, benefits and hazards, and their applications in ruminants with special reference to selenium and zinc nanoparticles. *Animals*, 11(7), 1916.
- Al-Beitawi, N.A., Momani Shaker, M., El-Shuraydeh, K. N. and Bláha, J. (2017). Effect of nanoclay minerals on growth performance, internal organs and blood biochemistry of broiler chickens compared to vaccines and antibiotics. *Journal of Applied Animal Research*, 45(1), 543-549.
- Ali, S., Masood, S., Zaneb, H., Faseeh-ur-Rehman, H., Masood, S., Khan, M.U.R. and Rehman, H. (2017). Supplementation of zinc oxide nanoparticles has beneficial effects on intestinal morphology in broiler chicken. *Pak Vet J.* 20(10), 1-5.
- Aparna, N., and Karunakaran, R. (2016). effect of selenium nanoparticles supplementation on oxidation resistance broiler chicken. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(1), 1-5.
- Awume, B., Tajallipour, M., Nemati, M., and Predicala, B. (2017). Application of ZnO nanoparticles in control of H₂S emission from low-temperature gases and swine manure gas. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(147), 1-16.
- Bhagat, S. and Singh, S. (2022). Nanominerals in nutrition: Recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*, 1(1), 111703.
- Bryla, M. and Trzcinska M. (2015). Quality and fertilizing capacity of boar spermatozoa during liquid storage in extender supplemented with different antibiotics. *Anim Reprod Sci.*; 163:157–63.
- Calderón-Nieva, D., Goonewardene, K.B., Gomis, S. and Foldvari, M. (2017). Veterinary vaccine nanotechnology: pulmonary and nasal delivery in livestock animals. *Drug Delivery and Translational Research*, 1-13.
- Calvo, L., Toldrá, F., Rodríguez, A.I., López-Bote, C. and Rey, A.I. (2017). Effect of dietary selenium source (organic vs. mineral) and muscle pH on meat quality characteristics of pigs. *Food Science & Nutrition*, 5(1), 94-102.
- Chavada, P.J. (2016). Novel Application of Nanotechnology in Dairy and Food Industry: Nano Inside. *International Journal of Agriculture Sciences*, 8:54. 2920-2922
- Dash, K.K., Deka, P., Bangar, S.P., Chaudhary, V., Trif, M. and Rusu, A. (2022). Applications of inorganic nanoparticles in food packaging: A Comprehensive Review. *Polymers*, 14(3), 521.
- Devasena, M. and Sangeetha, V. (2022). Cow urine: Potential resource for sustainable agriculture. In *Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production* (pp. 247-262). Academic Press.
- El Basuini, M.F., El-Hais, A.M., Dawood, M. A. O., Abou-Zeid, A.S., EL-Damrawy, S.Z., Khalafalla, M.S. and Dossou, S. (2017). Effects of dietary copper nanoparticles and vitamin C supplementations on growth performance, immune response and stress resistance of red sea bream, *Pagrus major*. *Aquaculture Nutrition*. 1. 1-12.
- El-Sayed, A. and Kamel, M. (2020). Advanced applications of nanotechnology in veterinary medicine. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 19073-19086.
- Feugang, J.M., Youngblood, R.C., Greene, J.M., Willard, S.T. and Ryan, P.L. (2015). Self-illuminating quantum dots for non-invasive bioluminescence imaging of mammalian gametes. *Journal of Nanobiotechnology*, 13(1), 38.
- Gangadoo, S., Stanley, D., Hughes, R.J., Moore, R. J. and Chapman, J. (2016). Nanoparticles in feed: Progress and prospects in poultry research. *Trends in Food Science & Technology*.
- Ganjigohari, S., Ziaei, N., Ramzani Ghara, A. and Tasharofi, S. (2017). Effects of nanocalcium carbonate on egg production performance and plasma calcium of laying hens. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 1. 1-8.
- Ganjigohari, S., Ziaei, N., Ramzani Ghara, A. and Tasharofi, S. (2017). Effects of nanocalcium carbonate on egg production performance and plasma calcium of laying hens. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 1. 1-8.

- Genchi, G., Lauria, G., Catalano, A., Carocci, A. and Sinicropi, M.S. (2021). The double face of metals: The intriguing case of chromium. *Applied Sciences*, 11(2), 638.
- Goel, A., Bhanja, S. K., Mehra, M., Majumdar, S. and Mandal, A. (2017). In ovo silver nanoparticle supplementation for improving the post-hatch immunity status of broiler chickens. *Archives of Animal Nutrition*, 1-11.
- Gonzales-Eguia, A., Fu, C.M., Lu, F.Y. and Lien, T.F. (2009). Effects of nanocopper on copper availability and nutrients digestibility, growth performance and serum traits of piglets. *Livestock Science*, 126(1), 122-129.
- Greenwood D.L., Dynon, K., Kalkanidis, M., Xiang, S., Plebanski, M. and Scheerlinck, J.P. (2008). Vaccination against foot and mouth disease virus using peptides conjugated to nanobeads. *Vaccine* 26: 2706–2713.
- Gu, X. and Gao, C.Q. (2022). New horizons for selenium in animal nutrition and functional foods. *Animal Nutrition*.
- Gulyás, G., Csosz, E., Prokisch, J., Jávora, A., Mézes, M., Erdélyi, M. and Czeglédi, L. (2017). Effect of nano-sized, elemental selenium supplement on the proteome of chicken liver. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 101(3), 502-510.
- Hamada, M., Shalby, S., Mohammed, H. and Ahmed, W. (2021). Effects of calcium nanoparticles on male rat fertility and sperm function. *Zagazig Veterinary Journal*, 49(3), 345-357.
- Hashem, N.M. and Gonzalez-Bulnes, A. (2021). Nanotechnology and reproductive management of farm animals: Challenges and advances. *Animals*, 11(7), 1932.
- Hill, E.K. and Li, J. (2017). Current and future prospects for nanotechnology in animal production. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), 26.
- Huang, S., Wang, L., Liu, L., Hou, Y. and Li, L. (2015). Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 369-400.
- Kassim, A.S., Ali, A., Marwan, T. A. and Abdel-Wareth, A.A.A. (2022). Selenium nanoparticles in rabbit nutrition. a review. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences*, 4(1), 90-98.
- Khan, Z., Khan, S.H., Ghouri, M.Z., Shahzadi, H., Arshad, S.F., Waheed, U., Firdous, S., Mehboob, Q. and Ahmad, A. (2019). Nanotechnology: An elixir to life sciences. Preprints 2019, 2019020235. <https://doi.org/10.20944/preprints201902.0235.v1>.
- Klein, J.P., Mery, L., Boudard, D., Ravel, C., Cottier, M. and Bitounis, D. (2023). Impact of nanoparticles on male fertility: What do we really know? A Systematic Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1), 576.
- Li, T.Y., Fu, C.M. and Lien, T.F. (2017). Effects of nanoparticle chromium on chromium absorbability, growth performance, blood parameters and carcass traits of pigs. *Animal Production Science*, 57(6), 1193-1200.
- Liu, Y., Carpenter, A.B., Pirozzi, C.J., Yuan, H., Waitkus, M.S., Zhou, Z. and Vo-Dinh, T. (2019). Non-invasive sensitive brain tumor detection using dual-modality bioimaging nanoprobe. *Nanotechnology*, 30(27), 275101.
- Maciejewski, R., Radzikowska-Büchner, E., Flieger, W., Kulczycka, K., Baj, J., Forma, A. and Flieger, J. (2022). An Overview of Essential Microelements and Common Metallic Nanoparticles and Their Effects on Male Fertility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 11066.
- Malyugina, S., Skalickova, S., Skladanka, J., Slama, P. and Horky, P. (2021). Biogenic selenium nanoparticles in animal nutrition: a review. *Agriculture*, 11(12), 1244.
- Milani, N.C., Sbardella, M., Ikeda, N.Y., Arno, A., Mascarenhas, B.C. and Miyada, V.S. (2017). Dietary zinc oxide nanoparticles as growth promoter for weanling pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 227, 13-23.
- Mohamed, M. M., Fouad, S. A., Elshoky, H. A., Mohammed, G.M. and Salaheldin, T.A. (2017). Antibacterial effect of gold nanoparticles against *Corynebacterium pseudotuberculosis*. *International Journal of Veterinary Science and Medicine*. 5. 27-29.
- Mohammadi, H., Farzinpour, A. and Vaziry, A. (2017). Reproductive performance of breeder quails fed diets supplemented with L-cysteine-coated iron oxide nanoparticles. *Reproduction in Domestic Animals*, 52(2), 298-304.

- Mohd,Y., Mohamad, R., Zaidan, U. H. and Abdul Rahman, N.A. (2019). Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *Journal of animal science and biotechnology*, 10, 1-22.
- Moniruzzaman, M., and Min, T. (2020). Curcumin, curcumin nanoparticles and curcumin nanospheres: A review on their pharmacodynamics based on monogastric farm animal, poultry and fish nutrition. *Pharmaceutics*, 12(5), 447.
- Mousavi, S.R. and Rezaei, M. (2011). Nanotechnology in agriculture and food production. *J Appl Environ Biol Sci*, 1(10), 414-419.
- Natasha, N., Shahid, M., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B. and Arshad, M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Science of the Total Environment*, 808, 152024.
- Osama, E., El-Sheikh, S. M., Khairy, M. H. and Galal, A. A. (2020). Nanoparticles and their potential applications in veterinary medicine. *Journal of Advanced Veterinary Research*, 10(4), 268-273.
- Pecoraro, B.M., Leal, D.F., Frias-De-Diego, A., Browning, M., Odle, J. and Crisci, E. (2022). The health benefits of selenium in food animals: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1), 1-11.
- Pei, X., Xiao, Z., Liu, L., Wang, G., Tao, W., Wang, M. and Leng, D. (2019). Effects of dietary zinc oxide nanoparticles supplementation on growth performance, zinc status, intestinal morphology, microflora population, and immune response in weaned pigs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1366-1374.
- Poddar, K. and Kishore, A.V. (2022). Nanotechnology in animal production. In *Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production* (pp. 149-170). Academic Press.
- Rahman, H.S., Othman, H.H., Abdullah, R., Edin, H.Y.A.S. and AL-Haj, N.A. (2022). Beneficial and toxicological aspects of zinc oxide nanoparticles in animals. *Veterinary Medicine and Science*, 8(4), 1769-1779.
- Rawat, K., Kurechia, N., Vandre, R., Jogi, J., Tandia, N., Shivhare, M. and Singh, S. (2022). Application of nanotechnology in veterinary science. *Ann. For. Res*, 65(1), 7047-7076.
- Reda, F.M., El-Saadony, M. T., El-Rayes, T. K., Attia, A. I., El-Sayed, S. A., Ahmed, S. Y. and Alagawany, M. (2021). Use of biological nano zinc as a feed additive in quail nutrition: biosynthesis, antimicrobial activity and its effect on growth, feed utilisation, blood metabolites and intestinal microbiota. *Italian Journal of Animal Science*, 20(1), 324-335.
- Sahoo, A., Swain, R. K. and Mishra, S. K. (2014). Effect of inorganic, organic and nano zinc supplemented diets on bioavailability and immunity status of broilers. *Int. J. Adv. Res*, 2(11), 828-837.
- Sapino, S., Chindamo, G., Chirio, D., Morel, S., Peira, E., Vercelli, C. and Gallarate, M. (2022). Nanocarriers in veterinary medicine: A challenge for improving osteosarcoma conventional treatments. *Nanomaterials*, 12(24), 4501.
- Shabani, A., Dastar, B., Hassani, S., Khomeiri, M. and Shabanpour, B. (2016). Decreasing the effects of aflatoxins on color and oxidative stability of broiler meats using nanozeolite. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(1), 109-121.
- Shannon, T. A., Ledoux, D. R., Rottinghaus, G. E., Shaw, D. P., Daković, A. and Marković, M. (2017). The efficacy of raw and concentrated bentonite clay in reducing the toxic effects of aflatoxin in broiler chicks. *Poultry science*, 96(6), 1651-1658.
- Smekalova, M., Aragon, V., Panacek, A., Prucek, R., Zboril, R. and Kvitek, L. (2016). Enhanced antibacterial effect of antibiotics in combination with silver nanoparticles against animal pathogens. *The Veterinary Journal*, 209, 174-179.
- Smith, D.M., Simon, J.K., and Baker Jr, J.R. (2013). Applications of nanotechnology for immunology. *Nature Reviews Immunology*, 13(8), 592-605.
- Srivastava, S. (2023). Ethical issues regarding the use of nanobiotechnology-based products. In *Nanobiotechnology for the Livestock Industry* (pp. 435-473). Elsevier.
- Swain, P.S., Rao, S. B., Rajendran, D., Dominic, G. and Selvaraju, S. (2016). Nano zinc, an alternative to conventional zinc as animal feed supplement: A review. *Animal Nutrition*, 2(3), 134-141.

- Swain, P.S., Rao, S. B., Rajendran, D., Dominic, G. and Selvaraju, S. (2016). Nano zinc, an alternative to conventional zinc as animal feed supplement: A review. *Animal Nutrition*, 2(3), 134-141.
- Szudrowicz, H., Kamaszewski, M., Adamski, A., Skrobisz, M., Frankowska-Łukawska, J., Wójcik, M. and Herman, A.P. (2022). The effects of seven-day exposure to silver nanoparticles on fertility and homeostasis of zebrafish (*Danio rerio*). *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11239.
- Taj, A., Zia, R., Iftikhar, M., Younis, S. and Bajwa, S.Z. (2022). Nanosensors for food inspection. In *Nanosensors for Smart Agriculture* (pp. 685-703). Elsevier.
- Tavakoli, R., Hashemi, S. R., Davoodi, D., Jafari, Y. and Hassani, S. (2020). Histopathologic investigation of liver and kidney tissues in broiler chickens fed silver nanoparticles coated on zeolite. *Journal of Animal Science Research*, 30(2), 15-23.
- Thulasi, A., Rajendran, D., Jash, S., Selvaraju, S., Jose, V. L., Velusamy, S. and Mathivanan, S. (2013). Nanobiotechnology in Animal Nutrition. Chapter 24. *Animal Nutrition and Reproductive Physiology*. Pp. 500-515.
- Torabian, F., Akhavan Rezayat, A., Ghasemi Nour, M., Ghorbanzadeh, A., Najafi, S., Sahebkar, A. and Darroudi, M. (2022). Administration of silver nanoparticles in diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis on animal studies. *Biological Trace Element Research*, 200(4), 1699-1709.
- Tsuji, P.A. and Hatfield, D.L. (2022). Editorial to special issue molecular biology of selenium in health and disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(2), 808.
- Underwood, C. and Van Eps, A.W. (2012). Nanomedicine and veterinary science: The reality and the practicality. *The Veterinary Journal*, 193(1), 12-23.
- Visha, P., Nanjappan, K., Selvaraj, P., Jayachandran, S. and Thavasiappan, V. (2017). Influence of dietary nanoselenium supplementation on the meat characteristics of broiler chickens. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(5), 340-347.
- Wang, C., Zhang, L., Su, W., Ying, Z., He, J., Zhang, L. and Wang, T. (2017). Zinc oxide nanoparticles as a substitute for zinc oxide or colistin sulfate: Effects on growth, serum enzymes, zinc deposition, intestinal morphology and epithelial barrier in weaned piglets. *PloS one*, 12(7), 1-13.
- Woldeamanuel, K. M., Kurra, F. A. and Roba, Y. T. (2021). A review on nanotechnology and its application in modern veterinary science. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*, 7(1), 026-031.
- Xing, N., Guan, X., An, B., Cui, B., Wang, Z., Wang, X. and Tong, D. (2016). Ultrasensitive detection of porcine epidemic diarrhea virus from fecal samples using functionalized nanoparticles. *PloS one*, 11(12), 1-16.
- Yang, T., Gan, Y. N., Song, Z. F., Zhao, T.T. and Gong, Y.S. (2014). Effects of different sources and levels of Vitamin D3 on performance, eggshell quality and tibial quality of laying hens. *China J Anim Nutr*, 3, 659-666.
- Yildiz, A., Atay, Y. E. and Akar, Y. (2022). Nanotechnology in veterinary medicine. *The Trends in Nano Materials Synthesis and Applications*, 47.
- Younas, Z., Mashwani, Z. U.R., Ahmad, I., Khan, M., Zaman, S. and Sawati, L. (2023). Mechanistic approaches to the application of nano-zinc in the poultry and biomedical industries: A comprehensive review of future perspectives and challenges. *Molecules*, 28(3), 1064.
- Zhang, J., Li, Z., Yu, C., Liu, H., Zhou, B., Zhang, X. and Wang, C. (2022). Efficacy of using zinc oxide nanoparticle as a substitute to antibiotic growth promoter and zinc sulphate for growth performance, antioxidant capacity, immunity and intestinal barrier function in broilers. *Italian Journal of Animal Science*, 21(1), 562-576.
- Zhao, Y., Feng, Y.N., Li, L., Zhang, H.F., Zhang, Y.N., Zhang, P.F. and Shen, W. (2017). Tissue-Specific Regulation of the Contents and Correlations of Mineral Elements in Hens by Zinc Oxide Nanoparticles. *Biological trace element research*, 177(2), 353-366.
- Zhu, C., Lv, H., Chen, Z., Wang, L., Wu, X., Chen, Z. and Jiang, Z. (2017). Dietary zinc oxide modulates antioxidant capacity, small intestine development, and jejunal gene expression in weaned piglets. *Biological trace element research*, 175(2), 331-338.