

Nanopartículas de selenio en la agricultura para la alimentación de rumiantes y la disminución de gases de efecto invernadero

Selenium nanoparticles in agriculture for ruminant feed and greenhouse gas reduction

Uriel González-Lemus^a, José Jesús Espino-García^a, Isaac Almaraz-Buendía^a, Antonio de Jesús Cenobio-Galindo^a, Ana Karen Zaldivar-Ortega^a, Rafael Germán Campos-Montiel^{a*}

Abstract:

Nanotechnology has shown promising potential to promote agriculture. Nanotechnology has allowed the use of nanoparticles (NPs) as a green and ecological alternative for the sustainable management of phytopathogenic diseases, such as trying to replace chemical pesticides that affect both the environment and human health, raises the need for new methods and more suitable for agricultural production. Some studies demonstrate the benefits of NP of Se in the beneficial physiological response in the development and performance of plants. In addition, it shows effects against some pathogenic organisms that commonly occur in crops. On the other hand, Se in plants modifies plant metabolism, potentiating the enzymatic activity of phenylalanine ammonium lyase (PAL), increasing phenolic compounds in forage plants for animals, it can generate changes in ruminal fermentation, affecting the microbiota since these phenolic compounds can bind to the cell wall of microorganisms causing morphological changes or secretion of extracellular enzymes that cause changes in their metabolism and promote the reduction of greenhouse gases produced by ruminal fermentation (CO₂ and CH₄), which are accumulated in the atmosphere that affect and result in climate change. Therefore, some investigations have found a positive correlation with the increase of phenolic compounds in plants due to the supply of Se and the effect on reducing greenhouse gases.

Keywords:

nanotechnology, nanoparticles, selenium, agriculture, animal nutrition, greenhouse effect

Resumen:

La nanotecnología ha mostrado un potencial prometedor para promover la agricultura. La nanotecnología ha permitido el uso de las nanopartículas (NP) como una alternativa verde y ecológica para el manejo sustentable de enfermedades fitopatológica, como es el tratar de sustituir los plaguicidas químicos que afectan tanto al medio ambiente como a la salud humana plantea la necesidad de métodos nuevos y más adecuados en la producción agrícola. Existen estudios que demuestran los beneficios de las NP de Selenio (Se) en la respuesta fisiológica beneficiosa del desarrollo y rendimiento de las plantas. Además, de mostrar efectos contra algunos organismos patógenos que comúnmente se presentan en los cultivos. Por otra parte, el Se en las plantas modifica en el metabolismo de las plantas potencializando la actividad enzimática de la fenilalanina amonio liasa (PAL) incrementando los compuestos fenólicos en las plantas forrajeras para los animales puede generar cambios en la fermentación ruminal, teniendo un efecto sobre la microbiota ya que estos compuestos fenólicos pueden unirse a la pared celular de los microorganismos causando cambios morfológicos o secreción de enzimas extracelulares que provocan cambios en su metabolismo y promover la disminución de los gases de efecto invernadero producidos por la fermentación ruminal (CO₂ y CH₄), los cuales son acumulados en la atmósfera que afectan y traen como consecuencia el cambio climático. Por lo tanto, existen investigaciones que han encontrado una correlación positiva con el incremento de compuestos fenólicos en plantas por el suministro de Se y el efecto en la disminución de gases de efecto invernadero.

Palabras Clave:

nanotecnología, nanopartículas, selenio, agricultura, nutrición animal, efecto invernadero.

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Uriel González-Lemus, <https://orcid.org/0000-0002-7050-0874>, Email: uriel_gonzalez@uaeh.edu.mx; José Jesús Espino-García, <https://orcid.org/0000-0003-2353-6054>, Email: es010437@uaeh.edu.mx; Isaac Almaraz-Buendía, <https://orcid.org/0000-0001-9404-1548>, Email: isaac_almaraz9974@uaeh.edu.mx; Antonio de Jesús Cenobio-Galindo, <https://orcid.org/0000-0003-3098-0487>, Email: antonio_cenobio@uaeh.edu.mx; Ana Karen Zaldivar-Ortega, <https://orcid.org/0000-0002-0436-8473>, Email: ana_saldivar@uaeh.edu.mx; Rafael German Campos-Montiel, <https://orcid.org/0000-0001-7382-5538>, Email: rcampos@uaeh.edu.mx.

* Autor de Correspondencia: Email: uriel_gonzalez@uaeh.edu.mx

Fecha de recepción: 30/03/2022, Fecha de aceptación: 04/12/2023, Fecha de publicación: 05/01/2024

DOI: <https://doi.org/10.29057/icap.v10i19.8891>



1. Introducción

El selenio (Se) es un oligoelemento traza escaso en la corteza terrestre y se encuentra distribuido en todas las partes de la tierra. El Se es considerado muy importante en la nutrición humana y animal. El Se es importante debido a que es esencial para formar proteínas y ser cofactor de enzimas antioxidantes como el glutatión peroxidasa (GPX), la cual tiene como función reducir las especies reactivas al oxígeno (ERO). La carencia de Se en los mamíferos provoca deficiencias fisiológicas y nutricionales [1]. La nanotecnología es un término general que se utiliza para describir las tecnologías que funcionan en nanoescala para su utilización en aplicaciones del mundo real. Las nanopartículas (NP) son agregados atómicos o moleculares con tamaños variables que oscilan entre 1 y 100 nm [2]. Las NP presentan propiedades fisicoquímicas diferentes en comparación de las partículas macro las cuales pueden servir para reducir la toxicidad, aumentar la bioactividad, mejorar la orientación y proporcionar medios versátiles para controlar el perfil de liberación. Entre las diferentes NP inorgánicas de elementos como Ag, Au, Ce, Fe, Zn y Se, ocupan un lugar importante debido a sus bioactividades únicas en nanoformas [3]. Las nanopartículas de selenio (NP de Se) son partículas elementales de selenio de tamaño nanométrico (generalmente <60 nm de diámetro) con excelentes nanopropiedades en particular, las NP de Se han mostrado menos toxicidad en plantas que otras formas inorgánicas del Se [4]. La producción vegetal actual depende de la capacidad de los agricultores para transportar y reciclar minerales, en particular aquellos minerales que son nutricionalmente importantes para los animales y los seres humanos, a través de diversos productos agrícolas. Por lo que surge el interés de las aplicaciones potenciales de la nanotecnología en las industrias alimentaria y agrícola. Se han realizado varios estudios sobre las diversas actividades biológicas de las nanopartículas de selenio (NP de Se) y su biosíntesis [5]. Con el avance de la ciencia, ha incrementado el número de estudios sobre el uso de la nanotecnología, como lo es el desarrollo de NP y la aplicación de éstas en plantas de cultivo. En la actualidad cada día hay más formas de usar NP de Se en el campo de la

agricultura, como la adición de Se al suelo, el cultivo hidropónico y aeropónico, el remojo de semillas en la solución de NP de Se o la aplicación foliar de NP de Se [6]. Las plantas pueden beneficiarse del uso de NP de Se tales como la biofortificación en las cosechas usando NP de Se para aumentar su contenido, disminuyendo el estrés abiótico y aumentando la calidad nutracéutica de los alimentos consumibles y presentando características de fertilizantes y bactericidas [7]. Las nanopartículas se han utilizado en la nutrición animal por sus propiedades antibacterianas, antifúngicas y antioxidantes, así como probióticos y para mantener el rendimiento y la salud general de los animales [8].

2. La nanotecnología y sus aplicaciones

La nanotecnología (NT) se considera como un avance tecnológico-científico que se refiere a estructuras que equivalen a la mil millonésimas partes de algo, en la cual los materiales y las estructuras se encuentran en escalas de 0.1 a 100 nm, actualmente posee una aplicación en los distintos campos de la ciencia [9]. La NT en los últimos años ha evolucionado gracias a las múltiples aportaciones interdisciplinarias de ideas y propuestas que surgen de la biología, química, física, ingeniería y la medicina; donde se conjuntan estrategias que están permitiendo diseñar, sintetizar y fabricar materiales [7]. La aplicación de la NT en campos específicos como la agricultura y en la industria alimentaria tanto para humanos y animales va en aumento debido a sus beneficios potencialmente demostrados. Existe diversos desarrollos de la nanotecnología, sin embargo, las NP son de lo más conocido y estudiado. Las NP son estructuras con un tamaño menor a los 100 nm (1×10^{-7}). y las cuales pueden ser sintetizadas a partir de distintos materiales incluyendo a los metales, Además, gracias a su tamaño tan pequeño y forma pueden incorporar sustancias que faciliten el reconocimiento de las células y los tejidos [10].

3. Selenio y nanopartículas de Selenio

El selenio (Se) es un oligoelemento traza escaso en la corteza terrestre y se encuentra distribuido en

todas las partes de a tierra. Se considerado muy importante en la nutrición humana y animal. El selenio es importante debido a que es esencial para formar proteínas y ser cofactor de enzimas antioxidantes como el glutatión peroxidasa (GPX), la cual tiene como función reducir las especies reactivas al oxígeno (ERO). La carencia de Se en los mamíferos provoca deficiencias fisiológicas y nutricionales además de patologías ya que el Se forma al menos 25 selenoproteínas que cumplen funciones antioxidantes, antivirales y antitumorales [1, 11]. Las nanopartículas (NP) sirven para reducir la toxicidad, aumentar la bioactividad, mejorar la orientación y proporcionar medios versátiles para controlar el perfil de liberación. Entre las NP inorgánicas de metales como Ag, Au, Ce, Fe, Zn y Se, ocupan un lugar importante debido a sus bioactividades únicas en nanoformas [3].

4. Nanopartículas de selenio en la agricultura

Los expertos en las ciencias agrícolas enfrentan diferentes desafíos, tales como el bajo rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de macro y micronutrientes, la disminución de materia orgánica del suelo, carencias multinutricionales, el cambio climático, la reducción de la disponibilidad de tierras cultivables, así como la falta de agua y mano de obra en el sector [12]. Para resolver estos problemas, la nanotecnología encuentra aplicaciones para descubrir el uso de diferentes tipos de nanomateriales, como lo son las NP.

La nanotecnología ha permitido el uso de las NP como una alternativa verde y ecológica para el manejo sustentable de enfermedades fitopatógena, como es el tratar de sustituir los plaguicidas químicos que afectan tanto al medio ambiente como a la salud humana plantea la necesidad de métodos nuevos y más adecuados en la producción agrícola. El uso extensivo y creciente de las NP de Se ha permitido hacer frente a los hongos patógenos de las plantas como *Macrophomina phaseolina*, *Sclerotinia sclerotiorum* y *Diaporthe longicolla* [13]. Tal es el caso de El-Saadony et al [14] donde utilizaron nanopartículas biológicas de selenio (BioSeNP) sintetizadas por *Lactobacillus acidophilus* ML14 en el control de las enfermedades de la pudrición de la corona y la raíz del trigo (CRDs) inducidas por *Fusarium* spp., especialmente

Fusarium culmorum y *Fusarium graminearum*, donde en condiciones de invernadero, el trigo suplementado con BioSeNP (100 µg/mL) mejoró considerablemente el crecimiento de las plantas, la cantidad y la calidad del grano en un 5-40 %. Por otra parte, las NP de Se han demostrado que el suministro como fertilizante en bajas concentraciones tiene una influencia beneficiosa en el desarrollo y rendimiento de las plantas. Es decir, pueden funcionar como un factor esencial al interferir con varios procesos fisiológicos de las plantas. En relación con la fitocaptación de NP de Se y su translocación, la determinación de la seguridad y la toxicidad de las NP de Se provoca una comprensión profunda de su absorción por diferentes plantas. Aquí, la comprensión de la fitocaptación de NP de Se y su translocación es esencial. Se han propuesto varias vías para explorar la absorción y la entrada en los sistemas de las plantas [15]. Mikula et al [16] demostraron que el uso de NP de Se cómo fertilizante en la planta de frijol mejora el desarrollo de la planta. La planta de frijol se evaluó y analizó el contenido de clorofila y proteína. Las plantas mostraron un crecimiento efectivo a altas concentraciones de NP de Se. De igual forma, el estudio realizado por Hussein et al [17] demostraron que las NP de Se mejoraron el crecimiento de los cultivos de maní al potencializar los pigmentos fotosintéticos, la peroxidación lipídica, las enzimas antioxidantes (ácido ascórbico peroxidasa, catalasa, peroxidasa), los azúcares solubles totales, el contenido de fenoles y los flavonoides totales en las plantas.

5. Absorción y traslocación de las nanopartículas en las plantas para uso en la agricultura

De acuerdo con Fichert et al [18] menciona que las NP pueden ingresar por el sistema vascular de las plantas, lo cual permite que se transporten por la planta y propicien su efecto. Esta información se respalda con la hipótesis la cual menciona que las NP ingresan por las aperturas estomáticas las cuales pueden propiciar un incremento en la actividad metabólica y celular de en la planta, lo que promueve una mayor respuesta y rendimiento en el desarrollo de raíz, flores, hojas, frutos que los fertilizantes tradicionales [20, 21]. La traslocación y

penetración de las NP en las plantas es más eficiente cuando las NP son menores a 5 nm propiciando una mejor penetración en los estomas presentes en las hojas, permitiendo que las NP de hasta 20 nm pueden moverse vía intercelular a través de los plasmodesmos y acuaporinas de acuerdo a Tarafdar et al [22]. Las NP pueden aplicarse de dos formas distintas, mediante una aspersión foliar o una aplicación en el suelo. La aplicación foliar facilita el transporte de la partícula a diversos sitios de las plantas por las rutas del xilema y el floema, donde inducirán múltiples respuestas fisiológicas y bioquímicas, y la aplicación edáfica por medio del suelo comienza con el proceso de absorción y translocación en la raíz por la ruta del simplasto y apoplasto, permitiendo el paso a la corteza y penetrando la endodermis por el tejido conductivo del xilema; continuando con un movimiento ascendente en el xilema promoviendo el desarrollo de la raíz [12]. Tal es el caso del estudio realizado por Li et al [23] donde realizaron una aplicación foliar de NP de Se en apio, la cual mejoró significativamente la capacidad antioxidante total, los flavonoides totales, los fenoles totales y los niveles de vitamina C. Por otra parte, cuando se aplican las NP de Se al suelo se absorben por las raíces y se translocan principalmente por el apoplasto del xilema, tal y como fue demostrado en zacate Rye grass (*Lolium perenne*) [24].

6. Nanopartículas de Selenio en la nutrición animal y su efecto en la producción de gases de efecto invernadero

La nanotecnología específicamente con el uso de las NP posee un potencial capaz de revolucionar la producción agropecuaria, actualmente, existen diversos estudios sobre el uso de estas en la producción zootécnica. Las aplicaciones en producción animal incluyen el objetivo de facilitar y optimizar los procesos de producción de alimentos de origen animal, mejor comprensión de los fenómenos que rigen la nutrición animal desde la ingestión de la dieta hasta la captación y utilización de los nutrientes [12]. En los últimos años, la atención se ha centrado en las nanopartículas de selenio obtenidas por síntesis química. La situación actual del planeta y condiciones climáticas exige una mayor responsabilidad social que dirija la

investigación en una “vía verde” que es más ecológica [9]. Las nanopartículas de selenio biogénico representan para la investigación en el uso de esta nueva forma de selenio en la nutrición animal que se caracterizan por la baja toxicidad, mejor actividad antioxidante y el incremento de la respuesta inmune del cuerpo. Sin embargo, sus beneficios pueden ser mucho mayores, como han demostrado numerosos estudios *in vitro*. Las plantas son la principal fuente de Se para los animales de pastoreo que se alimentan de forraje, como el ganado vacuno, ovino y caprino [8]. El interés de las NP de Se se debe principalmente a las propiedades fisicoquímicas, alta estabilidad, hidrofobicidad y gran área de superficie. El tamaño de las NP afecta la ingesta celular y les permite pasar fácilmente a través de la pared del estómago y difundirse en las células del cuerpo más rápido que los elementos comunes con partículas de mayor tamaño. Se encontró que la absorción *in vitro* de NP de Se con un diámetro de 0,1 μm era mayor que la de NP de 1 y 10 μm [25]. Las nanopartículas se han utilizado en la nutrición animal por sus propiedades antibacterianas, antifúngicas y antioxidantes, así como probióticos y para mantener el rendimiento y la salud general de los animales [8]. El estudio realizado por Romero-Pérez et al [26], demostró que las NP de selenito de sodio recubiertas con polímeros de metacrilato se complementaron por vía oral con rumiantes, lo que mejoró la absorción de selenio. Shi et al [27] afirman que el Se de tamaño nanométrico en la dieta mejoró el contenido de Se en la sangre y los tejidos y mejoró la fermentación ruminal y la utilización del alimento en ovejas, que fueron alimentadas con una dieta basal suplementada con 0,3, 3 y 6 g/kg MS de nano-Se. Por otra parte, el Se pueden contribuir en la disminución la producción de gases de efecto invernadero. En el estudio realizado por Almaraz et al [28] encontró que el suministro de Se (20, 40, 60 y 80 mg Se kg^{-1}MS) en heno de avena, existió una disminución en la producción de gas total en la fermentación conforme mayor fue el contenido de selenito de sodio. Esto debido a que el Se promueve la síntesis de compuestos fenólicos como los taninos. García et al [29] menciona que la presencia de selenio en las plantas que sirven como alimento para el animal, modifica la vía fenilpropanoide en el metabolismo de las plantas potencializando la

actividad enzimática de la fenilalanina amonio liasa (PAL), Por lo tanto, existen investigaciones que han encontrado una correlación positiva con el incremento de compuestos fenólicos en plantas por el suministro de Se [30]. El consumo de estos compuestos en las plantas forrajeras para los animales puede generar cambios en la fermentación ruminal, teniendo un efecto sobre la microbiota ya que estos compuestos fenolicos pueden unirse a la pared celular de los microorganismos causando cambios morfológicos o secreción de enzimas extracelulares que provocan cambios en su metabolismo [31]. Debido a lo anterior, el uso de de Se en forma de NPs puede ser una alternativa para potencializar estos efectos y promover la disminución de estos gases de efecto invernadero producidos por la fermentación ruminal, los cuales son acumulados en la atmosfera que afectan y traen como consecuencia el cambio climático.

7. Conclusiones

La nanotecnología ofrece novedosas soluciones a los problemas actuales, utilizando nanomateriales que impacten de forma positiva en la agricultura y la nutrición animal. Las plantas pueden beneficiarse del uso y aplicación de NP de Se mostrando un efecto contra organismos fitopatógenos además de mejorar las características fisiológicas de algunos cultivos. La deficiencia de selenio en la nutrición animal puede provocar muchas enfermedades en los animales lo cual puede disminuir biofortificado a los cultivos con NP de Se. La síntesis de compuestos fenólicos y el incremento debido a la incorporación de Se en las plantas forrajeras para los animales puede generar cambios en la fermentación ruminal, teniendo un efecto sobre la microbiota que provoca cambios en su metabolismo del rumiante promoviendo la disminución de los gases de efecto invernadero producidos por la fermentación ruminal (CO₂ y CH₄).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

Referencias

- [1] Gaucin-Delgado, J. M., Preciado-Rangel, P., González-Salas, U., Sifuentes-Ibarra, E., Núñez-Ramírez, F., & Vidal, J. A. O. (2021). La biofortificación con selenio mejora los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante en chile jalapeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), 1339-1349.
- [2] Kumar, A., Gupta, K., Dixit, S., Mishra, K., & Srivastava, S. (2019). A review on positive and negative impacts of nanotechnology in agriculture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 2175-2184.
- [3] Khurana, A., Tekula, S., Saifi, M. A., Venkatesh, P., & Godugu, C. (2019). Therapeutic applications of selenium nanoparticles. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 111, 802-812.
- [4] Lv, Q., Liang, X., Nong, K., Gong, Z., Qin, T., Qin, X., ... & Zhu, Y. (2021). Advances in research on the toxicological effects of selenium. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 106(5), 715-726.
- [5] Bano, I., Skalickova, S., Sajjad, H., Skladanka, J., & Horkey, P. (2021). Uses of Selenium Nanoparticles in the Plant Production. *Agronomy*, 11(11), 2229.
- [6] Hussein, H. A. A., Darwesh, O. M., & Mekki, B. B. (2019). Environmentally friendly nano-selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101080.
- [7] Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G. D. L., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.
- [8] Malyugina, S., Skalickova, S., Skladanka, J., Slama, P., & Horkey, P. (2021). Biogenic Selenium Nanoparticles in Animal Nutrition: A Review. *Agriculture*, 11(12), 1244.
- [9] Cuca-García, J. M. (2018). SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS Y SU APLICACIÓN EN LA NUTRICIÓN ANIMAL. *Agro Productividad*, 11(6), 85-90.
- [10] Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2).
- [11] Garduño-Zepeda, A., & Márquez-Quiroz, C. (2018). Aplicación de selenio en cultivos agrícolas. Revisión bibliográfica. *Información Técnica Económica Agraria*, 114(4), 327-343.
- [12] Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G. D. L., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.
- [13] Vrandečić, K., Čosić, J., Ilić, J., Ravnjak, B., Selmani, A., Galić, E., ... & Vinković, T. (2020). Antifungal activities of silver and selenium nanoparticles stabilized with different surface coating agents. *Pest Management Science*, 76(6), 2021-2029.
- [14] El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Najjar, A. A., Alzahrani, S. O., Alkhatib, F. M., Shafi, M. E., ... & Hassan, M. A. (2021). The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4461-4471.
- [15] Bano, I., Skalickova, S., Sajjad, H., Skladanka, J., & Horkey, P. (2021). Uses of Selenium Nanoparticles in the Plant Production. *Agronomy*, 11(11), 2229.
- [16] Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Mironiuk, M., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2020). Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture—A review. *Science of the Total Environment*, 712, 136365.

- [17] Hussein, H. A. A., Darwesh, O. M., & Mekki, B. B. (2019). Environmentally friendly nano-selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101080.
- [18] Eichert, T., Kurtz, A., Steiner, U., & Goldbach, H. E. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia plantarum*, 134(1), 151-160.
- [20] Lin, S., Reppert, J., Hu, Q., Hudson, J. S., Reid, M. L., Ratnikova, T. A., & Ke, P. C. (2009). Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants. *Small*, 5(10), 1128-1132.
- [21] Siskani, A., Seghatoleslami, M., & Moosavi, G. (2015, January). Effect of deficit irrigation and nano fertilizers on yield and some morphological traits of cotton. In *Biological Forum* (Vol. 7, No. 1, p. 1710). Research Trend.
- [22] Tarafdar, J. C., Xiong, Y., Wang, W. N., Quinl, D., & Biswas, P. (2012). Standardization of size, shape and concentration of nanoparticle for plant application. *Applied Biological Research*, 14(2), 138-144.
- [23] Li, D., An, Q., Wu, Y., Li, J. Q., & Pan, C. (2020). Foliar application of selenium nanoparticles on celery stimulates several nutrient component levels by regulating the α -linolenic acid pathway. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(28), 10502-10510.
- [24] Lin, D., & Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science & Technology (ACS)*, 42(15), 5580-5585.
- [25] Desai, M. P., Labhasetwar, V., Walter, E., Levy, R. J., & Amidon, G. L. (1997). The mechanism of uptake of biodegradable microparticles in Caco-2 cells is size dependent. *Pharmaceutical research*, 14(11), 1568-1573.
- [26] Romero-Pérez, A., García-García, E., Zavaleta-Mancera, A., Ramírez-Bribiesca, J. E., Revilla-Vázquez, A., Hernández-Calva, L. M., ... & Cruz-Monterrosa, R. G. (2010). Designing and evaluation of sodium selenite nanoparticles in vitro to improve selenium absorption in ruminants. *Veterinary research communications*, 34(1), 71-79.
- [27] Shi, L., Xun, W., Yue, W., Zhang, C., Ren, Y., Liu, Q., ... & Shi, L. (2011). Effect of elemental nano-selenium on feed digestibility, rumen fermentation, and purine derivatives in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 163(2-4), 136-142.
- [28] Almaraz-Buendia, I., Razo-Rodríguez, O., Salinas-Martínez, J. A., Campos-Montiel, R., & Ramirez-Bribiesca, E. (2018). Inhibitory effect of selenium concentrations on microbial activity during oat hay in vitro rumen fermentation. *Agrociencia*, 52(4), 511-521
- [29] García Márquez, V., Morelos Moreno, Á., Benavides Mendoza, A., & Medrano Macías, J. (2020). Ionic selenium and nanoselenium as biofortifiers and stimulators of plant metabolism. *Agronomy*, 10(9), 1399.
- [30] Sharma, S., Goyal, R., & Sadana, U. S. (2014). Selenium accumulation and antioxidant status of rice plants grown on seleniferous soil from Northwestern India. *Rice Science*, 21(6), 327-334.
- [31] Smith, A. H., Zoetendal, E., & Mackie, R. I. (2005). Bacterial mechanisms to overcome inhibitory effects of dietary tannins. *Microbial ecology*, 50(2), 197-205
- .