

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



Biofortificación del forraje de avena mediante la aplicación de nanopartículas de
hidroxiapatita

Por:

Luis Yair Castañeda Esquivel

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Torreón, Coahuila, México
Febrero 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Biofortificación del forraje de avena mediante la aplicación de nanopartículas de hidroxipatita

Por:

Luis Yair Castañeda Esquivel

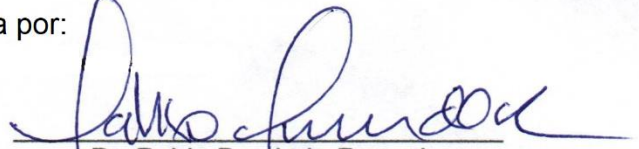
TESIS

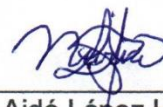
Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

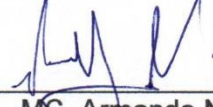
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por:


Dr. Ricardo Israel Ramírez Gottfried
Presidente


Dr. Pablo Preciado Rangel
Vocal


Dra. Nuria Aidé López Hernández
Vocal externo


MC. Armando Nahle Martínez
Vocal Suplente


MC. Rafael Avila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

*Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas*

Torreón, Coahuila, México
Febrero 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Biofortificación del forraje de avena mediante la aplicación de nanopartículas de hidroxipatita

Por:

Luis Yair Castañeda Esquivel

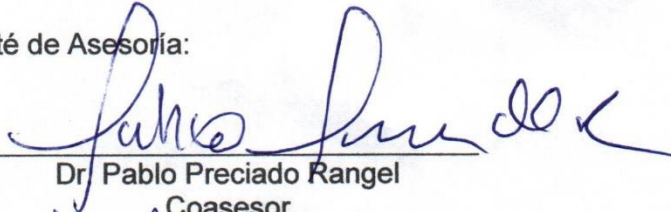
TESIS

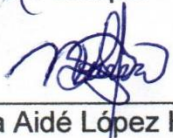
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

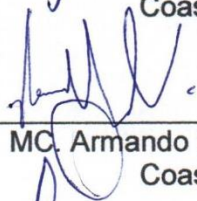
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

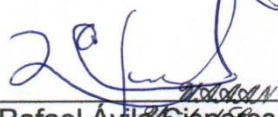
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Ricardo Israel Ramírez Gottfried
Asesor Principal


Dr. Pablo Preciado Rangel
Coasesor


Dra. Nuria Aidé López Hernández
Coasesor externo


MC. Armando Nahle Martínez
Coasesor


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



*Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas*

Torreón, Coahuila, México
Febrero 2026

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi padre, José Luis Castañeda Lomas, por su amor apoyo y aliento incondicional. Su constante presencia y motivación me han ayudado a superar los desafíos de esta investigación. Su ejemplo de trabajo duro dedicación y compromiso con la excelencia me han inspirado a ser la mejor versión de mí mismo. Su amor por el aprendizaje y su curiosidad por el mundo me han impulsado a explorar nuevos conocimientos. Su apoyo incondicional me ha dado la fuerza para seguir adelante, incluso los momentos más difíciles. Su amor y comprensión me han hecho sentir seguro y amado. Estoy muy agradecido por todo lo que has hecho por mí, papa. Eres mi héroe y mi mejor amigo.

A mi madre Anabel Esquivel de los Santos, quien desde pequeño me inculcó el amor por el aprendizaje, Gracias por tus sacrificios, por tus palabras de aliento y por siempre creer en mis sueños. Este logro es el fruto de tu amor y dedicación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Ricardo Israel Ramírez Gottfried por su guía, apoyo y paciencia. Su constante aliento y consejos me han ayudado a superar los desafíos de esta investigación

También quiero agradecer a mis profesores y colegas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por su apoyo y aliento. Agradezco a mis familiares y amigos, por su apoyo incondicional. Su amor y comprensión me han dado la fuerza seguir adelante. Finalmente, quiero agradecer a los participantes de mi investigación, por su tiempo y colaboración. Su participación ha hecho posible este estudio

Dedicatorias

A mis padres por apoyarme no hay palabras suficientes para expresar mi agradecimiento por todo lo que han hecho por mí.

Gracias por darme la vida y por criarme con amor y cariño. Gracias por enseñarme los valores que me han guiado en mi vida. Gracias por apoyarme en todo lo que he hecho.

Gracias por ser mis pilares, mis guías y mis mejores amigos. Gracias por estar siempre ahí para mí. Sin importar lo que pase.

Los amo mucho.

A mis amigos gracias por estar siempre ahí para mí. Gracias por su apoyo su amistad y su amor incondicional.

Ustedes han sido una parte integral de mi vida. Su aliento y su compañía me han dado la fuerza para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Estoy muy agradecido por su amistad. Ustedes son mi familia.

Resumen

La presente investigación evaluó el efecto de nanopartículas de hidroxiapatita de calcio (nHAp) sobre el rendimiento y calidad nutricional de *Avena sativa* variedad Cuauhtémoc, bajo condiciones de invernadero en la Comarca Lagunera. El estudio se fundamenta en el potencial de la nanotecnología agrícola para mejorar la eficiencia nutrimental y la productividad forrajera a mediante el uso de nanofertilizantes.

Se estableció un diseño completamente al azar con seis tratamientos (0-500 mgL⁻¹ de nHAp) y cinco repeticiones. Las nanopartículas fueron sintetizadas por precipitación química húmeda (10-45nm). Se evaluaron variables productivas, bromatológicas y de contenido mineral.

Las dosis de 200 y 300 mgL⁻¹ incrementaron significativamente el rendimiento (hasta 16.02 t ha⁻¹), mientras que el contenido de proteína cruda alcanzo 21.13% superando valores convencionales para la especie. Asimismo, se observó una mejora en la absorción de macroelementos, particularmente calcio.

Las aplicaciones de nHAp, especialmente en dosis intermedias, mejora la productividad y calidad nutricional de la avena, representando una alternativa sostenible para la producción forrajera regional

Palabras clave: Fibra detergente neutra, Fibra detergente Acida, Proteína Cruda, Materia seca, calidad forrajera

Abstract

Nanotechnology has emerged as an innovative strategy in agriculture, particularly in the development of nanofertilizers aimed at improving nutrient use efficiency and crop productivity. The present study evaluated the effect of calcium hydroxyapatite (nHAp) nanoparticles on the yield and nutritional quality of *Avena sativa* L. Cuauhtémoc variety, under greenhouse conditions in the Comarca Lagunera, Mexico. The experiment was established under a completely randomized design with six treatments (0, 100, 200, 300, 400 and 500 mg L⁻¹ nHAp) and five replications, using pots as experimental units. The nanoparticles were synthesized using the wet chemical precipitation method, obtaining sizes between 10 and 45 nm.

Productive, bromatological and mineral variables were evaluated, including green and dry forage yield, plant height, dry matter, neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), crude protein (CP), total nitrogen and macroelement content (P, Ca, Mg and K). The results indicated that the intermediate doses (200 and 300 mg L⁻¹) significantly increased yield, reaching up to 16.02 t ha⁻¹. The crude protein content reached a maximum of 21.13%, exceeding the conventional values reported for the species. The fiber fractions showed modified trends with respect to typical maturity patterns. Likewise, calcium concentration increased progressively with higher doses of nHAp, while phosphorus remained stable, suggesting better nutritional assimilation.

Overall, the application of nHAp, especially in intermediate concentrations, improved forage productivity and nutritional quality, demonstrating its potential as a sustainable alternative in forage production systems in semi-arid regions.

Keywords: Neutral detergent fiber, Acid detergent fiber, Crude protein, Dry matter, Forage quality

Índice General

Agradecimientos	i
Dedicatorias	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice General	vi
Índice de Cuadros	ix
Índice de Figuras	x
I. Introducción	1
1.1- Hipótesis	2
1.2- Objetivo general	2
1.3- Justificación	3
I. Revisión de literatura	4
Nanofertilizantes	4
Hidroxiapatita (HAP)	5
Los efectos de las nanopartículas (NP)	6
Avena forrajera	7
Valor nutricional de la avena	7
Composición química de los forrajes.	9

Materia seca	9
Proteína	9
La fibra	9
Fibra detergente neutra (FDN).	10
Fibra detergente ácido (FDA)	10
Cenizas	11
II. Materiales y métodos	12
Ubicación de la investigación	12
Datos climáticos del lugar.	12
Obtención de Nanopartículas	13
Material vegetal y manejo agronómico	14
Tratamientos y diseños experimental	15
Variables por evaluar	16
Altura de planta (cm)	16
Rendimiento forraje verde (t ha ⁻¹)	16
Rendimiento forraje seco (t ha ⁻¹)	17
Materia seca	17
Determinación de cenizas	18
Fibra Detergente Ácida (FDA)	19
Fibra Detergente Neutra (FDN)	20
Nitrógeno Total (NT) y Proteína Cruda (PC)	21
Macroelementos	21

III. Resultados y Discusión	22
FDN Y FDA	22
Proteína cruda (PC)	23
Altura de planta y materia seca	24
Rendimiento (ton ha ⁻¹)	24
Macroelementos (P, Ca, Mg y K)	25
Fósforo (P) y Calcio (Ca)	26
Magnesio (Mg) y Potasio (K)	26
IV. Conclusiones	28
V. Bibliografía	29

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Solución nutritiva Steiner para 200 L de agua. -----15

Cuadro 2: Resumen estadísticos de las variables analizadas en el cultivo de avena. -----22

Índice de Figuras

<i>Figura 1:Invernadero del departamento de riego y drenaje. (Google Earth Pro)</i>	12
<i>Figura 2: Proceso de precipitación química húmeda</i>	13
<i>Figura 3: Siembra de avena</i>	14
<i>Figura 4: Macetas como unidades experimentales</i>	15
<i>Figura 5: Altura de plantas del día de la cosecha</i>	16
<i>Figura 6: Determinación de cenizas</i>	18
<i>Figura 7: Molino de forraje</i>	19
<i>Figura 8: Digestor de fibra labconco</i>	20
<i>Figura 9: Equipo KJELTEC TM 8100</i>	21
<i>figura 10: Elementos minerales, P = Fósforo, Ca = Calcio, Mg = Magnesio, K= Potasio</i>	25

I. Introducción

El concepto de nanotecnología, se refiere a la manipulación de la materia a escala nanométrica (una millonésima parte de un milímetro), fue introducido por primera vez en 1974. Aunque el término es relativamente reciente, la humanidad ha utilizado de forma intuitiva principios de nanotecnología metálicas. Sin embargo, el estudio sistemático de estos materiales a nivel atómico y molecular es un campo relativamente nuevo. Los científicos están fascinados por las propiedades únicas que adquieren las sustancias a escala nanométricas, y buscan desarrollar métodos para producir nanopartículas con tamaños y características muy precisas, un desafío que ha persistido desde la antigüedad hasta nuestros días (Mendoza,2007). El interés por esta área está creciendo rápidamente gracias a sus prometedores beneficios, como la creación de nanofertilizantes, considerandos una mejor opción que los fertilizantes químicos tradicionales (Babu,2022), además, la encapsulación de las NPs en matrices poliméricas o minerales permite una liberación gradual y sostenida, optimizando sus uso y minimizando perdidas (Barman, 2022), se han utilizado diversos tipos nanopartículas, como el grafeno y los nanotubos de carbono, así como metales y sus óxidos, para desarrollar nuevas formulaciones de fertilizantes y plaguicidas a escala nanométrica (Bratovcic,2021)

La hidroxiapatita (nHAp) es un biocristal, formado por átomos de calcio, fósforo, e hidrógeno, de acuerdo con la fórmula $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{HO})_2$. La nHAp está presente en dientes y huesos confiriéndoles su dureza característica, pertenece a la familia de las apatitas, presenta una estructura hexagonal, con el grupo espacial $P6_3/m$. En la naturaleza las apatitas se pueden encontrar formando parte de las rocas

sedimentarias y metamórficas. En los huesos está siempre acompañada de estructuras orgánicas como la colágena. Otras apatitas de importancia biológica son la fluroapatita y la cloroapatita (Reyes-Gasga et al.,2006).

La Comarca lagunera, conocida por su actividad agrícola, enfrentó la necesidad de encontrar soluciones para aumentar tanto la productividad y la calidad de sus cultivos. En este sentido, la presente investigación propone explorar el potencial de las para mejorar la calidad de la avena forrajera. A través de la incorporación de nHAp en el cultivo de avena, se busca evaluar su impacto en el rendimiento y calidad con el propósito de determinar si esta tecnología puede contribuir a una producción forrajera más eficiente y sostenible en la región.

Los resultados de este estudio contribuirán a ampliar el conocimiento científico sobre el uso de nanopartículas en la agricultura.

1.1- Hipótesis

La aplicación de nanopartículas de hidroxiapatita de calcio influirá en el rendimiento y calidad del forraje de la avena

1.2- Objetivo general

Incrementar el rendimiento y la calidad de la avena mediante la aplicación de nanopartículas de hidroxiapatita de calcio

1.3- Justificación

La optimización de los sistemas productivos agrícolas, especialmente en regiones de alta demanda como la Comarca Lagunera, es un imperativo global.

En este contexto, la presente investigación se erige como una contribución significativa al campo de la agronomía al explorar el potencial de las nanopartículas de hidroxiapatita de calcio (nHAp) como una estrategia innovadora para mejorar el rendimiento y la calidad nutricional de la avena forrajera.

La elección de la avena forrajera como cultivo objeto de estudio se fundamenta en su relevancia económica y social para la región. Al ser componente esencial en la alimentación animal, cualquier mejora en su valor nutricional repercute directamente en la productividad ganadera y, por ende, en la cadena agroalimentaria.

Si bien existen estudios que demuestran los beneficios de las nanopartículas en diversos campos, su aplicación en la agricultura, y específicamente en la avena forrajera, es un área aun poco explorada. Los resultados de esta investigación contribuirán a llenar este vacío de conocimiento y a generar información relevante para el desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

Al evaluar el impacto de las HAP en el contenido de proteínas y fibra de la avena. El estudio no solo busca mejorar la calidad del forraje para la alimentación animal, sino también contribuir a la optimización de los procesos productivos en la región. Además, los hallazgos obtenidos podrían tener implicaciones más amplias en la agricultura, al abrir nuevas perspectivas para el uso de nanopartículas en otros cultivos y sistemas de producción.

I. Revisión de literatura

Nanofertilizantes

Los nanofertilizantes, diseñados a escala nanométrica, ofrecen una nutrición vegetal más precisa y eficiente. Al encapsular nutrientes en nanopartículas, se logra una liberación controlada y prolongada, optimizando su absorción por las raíces. Además, estos nanomateriales pueden mejorar la solubilidad de nutrientes poco disponibles, aumentar la superficie de contacto con las plantas y favorecer la interacción con microorganismos beneficiosos del suelo. La versatilidad de los nanofertilizantes permite desarrollar formulaciones específicas para diferentes cultivos y condiciones edáficas, contribuyendo a una agricultura más sostenible y productiva (Zahra,2022)

Estudios previos han demostrado el potencial de las nanopartículas de hidroxiapatita de calcio (Ca) así como magnesio (Mg), para mejorar el rendimiento de cultivos (Liu,2014) reportaron un aumento significativo en el rendimiento de semillas de soya (*Glycine max*) al utilizar nanopartículas, mientras que (Liu X et al 2004) y (Delfani, 2014) observaron incrementos en la biomasa de maní (*Arachis hypogaeae*) y el peso de semillas de frijol caupí (*vigna unguiculata*), respectivamente, al emplear nanopartículas de Ca y Mg como alternativas a los macronutrientes convencionales.

Hidroxiapatita (HAP)

La síntesis de hidroxiapatita (HAP) fue realizada a mediados del siglo XX por Barrett y su equipo. Estos investigadores lograron obtener un material con una composición química y estructura cristalina notablemente similares a las del tejido óseo, como lo evidenciaron estudios de difracción de rayos X (Barrett et al,1951).

Por otro lado, se ha demostrado que los fosfatos de calcio nanoestructurados (nFC) también nombrados hidroxiapatita, debido a su alta área superficial específica, tienen una alta capacidad de atrapar en su estructura fármacos, genes y proteínas, además de un alto rendimiento de liberación controlada de estos mismos elementos. Por esta razón son reconocidos como nanotransportadores prometedores por la industria farmacéutica (Flores-Hernández,2020).

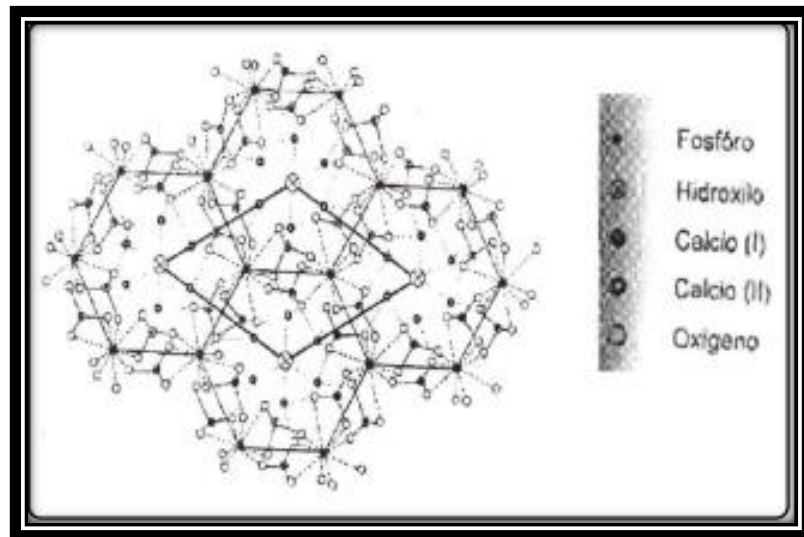


figura 1. Arreglo en la celda unitaria hexagonal de la hidroxiapatita, mostrado las posiciones del Ca, P, O e H dentro de la celda unitaria. Fuente: Reyes-Gasga (2006).

Los efectos de las nanopartículas (NP)

Diversos estudios han evaluado los efectos de las nanopartículas en estos procesos, centrándose en los compuestos metabólicos debido a su potencial toxicidad. Por ejemplo, las NP de CuO no afectaron las germinaciones de semillas de calabaza y maíz, pero si inhibieron el crecimiento radicular (Stampoulis, 2009).

Investigaciones han evidenciado que las nanopartículas pueden inhibir el desarrollo vegetal afectar procesos fundamentales como la síntesis de clorofila y la eficiencia fotosintética. Estos efectos adversos son dependientes de factores como la especie vegetal, el tipo de nanopartícula y su concentración (Goswami,2019). Estudios específicos han demostrado que las nanopartículas de CuO pueden penetrar las células vegetales, causado daños a niveles celular y genético (Moschini et al,2013). Estudios previos han demostrado que las NPs pueden causar estrés oxidativo en plantas al interferir con la cadena de transporte de electrones en cloroplastos y mitocondrias (Hossain-et al,2015) Este estrés se manifiesta a través de un incremento en la producción de ROS, lo que puede dañar el ADN de estos organelos y afectar la función de proteínas clave, comprometiendo así la viabilidad de las plantas (Atha-et al,2012).

Las nanopartículas de TiO₂ han demostrado ser beneficiosas para el crecimiento de plantas. Al aplicarlas a semillas de soya, se observó una aceleración en la germinación y aumento en la absorción de agua y nutrientes, lo que se tradujo en un mayor desarrollo de la planta (Lu,2002).

Además, estas nanopartículas también han mostrado un efecto positivo en el crecimiento de la espinaca, estimulando procesos fundamentales como el metabolismo del nitrógeno y la fotosíntesis (Yang, 2007).

Avena forrajera

Con una historia que se remonta a Asia menor, la avena llegó a México gracias a la colonización española. Su cultivo se ha consolidado como una práctica agrícola relevante en el país, especialmente por su valor nutricional. La avena forrajera, rica en fibra, proteínas y compuestos bioactivos, es un alimento versátil que se utiliza tanto para el consumo animal fresco como para la producción de heno ensilado y grano, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y a la salud de los animales (Villazón- Bustillos,2017).

En México, el cultivo de avena (*Avena sativa* L.) representa una actividad agrícola de importancia. Durante el ciclo agrícola 2021, se registraron 645.5 mil hectáreas dedicadas a la producción de la avena forrajera, generando aproximadamente 10 millones de toneladas. Por otro lado, la superficie sembrada para grano fue de 49.4 mil hectáreas, con una producción total de alrededor 101 mil toneladas. Estos datos reflejan la relevancia de este cultivo en el sector agrícola mexicano (Evelin-Ramírez,2023).

Valor nutricional de la avena

La producción de avena forrajera implica un equilibrio entre cantidad y calidad. Los resultados investigativos indican que la calidad nutricional del forraje especialmente el contenido proteína y fibra, se ve significativamente influenciada por el momento de la cosecha.

Para obtener un forraje de alta calidad, ideal para la alimentación animal, se recomienda cortar la avena en estado vegetativo. Sin embargo, si el objetivo es maximizar el rendimiento en términos de biomasa, las etapas de grano avanzado son más favorables. La composición morfológica de la planta, que varía según su desarrollo, explica estas diferencias. La etapa lechoso-masoso a masoso-suave se destaca como el momento óptimo para obtener un forraje con un buen balance entre cantidad y calidad, presentando valores adecuados de digestibilidad y energía (Ricardo-Sánchez et al,2014).

Debido a su contenido alimenticio la avena forrajera en la mayor parte del país es utilizada como alimento para ganado. Desde el punto de vista práctico, el valor nutricional de un forraje depende principalmente de su contenido de proteína y carbohidratos, así como el grado en que estén disponibles como principios nutritivos digestibles. Se sabe que un 85 a 90 % aproximadamente del contenido del nitrógeno celular de las plantas forrajeras, es de proteína constituida por aminoácidos (GIL, 2014).

La alta digestibilidad de esta gramínea, evidenciada por su bajo contenido de fibra detergente ácido (28%), la convierte en un alimento altamente palatable y eficientemente utilizado por el ganado. Su rico perfil nutricional, con niveles sobresalientes de proteína y energía, garantiza una nutrición completa y equilibrada para los animales (AAG, 2015).

GIL, (2014) dice que los cereales tienen muchas características que los hacen útiles para forrajes, dando grandes rendimientos ricos en proteínas, vitaminas y carbohidratos digestibles y subrayando también que, de acuerdo a la palatabilidad

de los cereales, se sitúa en primer lugar a la avena, luego la cebada y por último el centeno.

Composición química de los forrajes.

Materia seca

Mediante la técnica de secado por calor, es posible cuantificar la humedad presente en una muestra y, por ende, determinar su contenido de materia seca (Loayza, 2016). El residuo sólido obtenido, libre de agua, está conformado por una diversidad de biomoléculas, tales como proteínas, lípidos, carbohidratos y componentes minerales (Granados, 2010).

Proteína

Para cuantificar el contenido proteico de la muestra, se utiliza el método de Kjeldahl. Este método se basa en la conversión del nitrógeno orgánico presente en la proteína a amoníaco, el cual es cuantificado mediante una valoración. Al multiplicar el nitrógeno determinado por un factor de conversión específico, se obtiene el contenido de proteína bruta. Este valor es de gran utilidad en la caracterización nutricional de forrajes y otros productos orgánicos (Mora, 2012).

La fibra

La fibra desempeña un papel fundamental en la nutrición de los rumiantes. Al estimular la masticación y la rumia, contribuye a mantener un pH óptimo en el rumen, lo cual es esencial para una flora microbiana saludable y una eficiente fermentación de los alimentos (Pedro-Díaz, 2018).

Fibra detergente neutra (FDN).

La fibra detergente neutra es una herramienta esencial en la nutrición animal. Nos permite calcular la energía que un animal puede obtener de su alimento y a su vez, determinar la cantidad optima de comida que debe consumir. Esta fibra como un regulador natural de la ingesta (Carpenter, 2017).

Un alto contenido de fibra detergente neutra en un forraje se asocia a una menor ingesta de alimento, debido a que la fibra forma un retículo ruminal y en consecuencia, un mayor consumo de alimento y una potencialmente mayor producción láctea (Noreña, 2017)

Fibra detergente ácido (FDA)

La fibra detergente ácido representa la fracción insoluble en detergente ácido de un alimento. Está compuesta principalmente por celulosa y lignina, junto con pequeñas cantidades de nitrógeno y minerales, los cuales no son digeribles por los animales (Alex-Bach, 2006)

La determinación de la fibra detergente ácido permite cuantificar los componentes estructurales de la pared celular, principalmente celulosa y lignina. La lignina, al ser una sustancia altamente resistente a la degradación, reduce la digestibilidad de la celulosa. En consecuencia, existe una relación inversa entre el contenido de FDA y la digestibilidad total del alimento (Meléndez, 2015).

Noreña, (2017) nos dice que, a mayor fibra detergente ácida, menor digestibilidad del alimento. Es decir, mientras más FDA tenga un alimento, más difícil será que el animal lo digiera.

Cenizas

Las cenizas de un alimento son el resultado de la incineración de la materia orgánica y representan la porción del alimento. Es importante destacar que la composición de las cenizas diferir de la composición mineral original debido a la pérdida de ciertos elementos volátiles durante la calcinación y a las reacciones químicas que pueden ocurrir entre los componentes minerales a altas temperatura (Márquez, 2014).

II. Materiales y métodos

Ubicación de la investigación

Este estudio se realizó en el invernadero del departamento de riego y drenaje ubicado dentro de las instalaciones de Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna localizada en el Periférico Raúl López Sánchez s/n. Col. Valle Verde CP 27059, Torreón, Coahuila Ubicada $25^{\circ}33'27''$ N latitud norte y $103^{\circ}22'27''$ O longitud oeste.



Figura 1: Invernadero del departamento de riego y drenaje. (Google Earth Pro)

Datos climáticos del lugar.

En esta zona el clima es seco y semicálido durante el año, las temperaturas medias anuales oscilan entre los 27 a 30 C °, en invierno pueden llegar hasta los 0 C °, la precipitación media anual es de 125 a 400 mm (Granados y Ramírez, 2010).

Obtención de Nanopartículas

Se sintetizaron nanopartículas de hidroxiapatita de calcio (nHAp) mediante precipitación química húmeda. Se utilizaron dos métodos de agitación, mecánica y magnética, para controlar el tamaño de las partículas, logrando un rango de 10 a 45 nanómetros, con predominancia entre 15 y 20 nm. La síntesis se realizó sin calcinación, reduciendo el impacto ambiental. Las nanopartículas de fosfato de calcio (nCF) se obtuvieron a través de reacciones químicas con ácido fosfórico y compuestos de calcio, como hidróxido de calcio y nitrato de calcio, siguiendo dos rutas de reacción específicas (Flores-Hernandez, 2020):

1. Reacción con hidróxido de calcio: $6\text{H}_3\text{PO}_4 + 10\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 18\text{H}_2\text{O}$
2. Reacción con nitrato de calcio y fosfato de amonio: $10(\text{CaNO}_3)_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 6(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + 8\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 20\text{NH}_4\text{NO}_3 + 46\text{H}_2\text{O}$



Figura 2: Proceso de precipitación química húmeda

Material vegetal y manejo agronómico

Se empleó materia vegetal de la especie *Avena sativa*, de la variedad CUAUHTÉMOC. La preparación del medio de cultivo consistió en la elaboración de un sustrato homogéneo, compuesto por una mezcla 1:1:1 de arena de río, peat moss y perlita. Dicho sustrato fue sometido a esterilización mediante autoclave, con el fin de garantizar la eliminación de microorganismos contaminantes y patógenos. La siembra por maceta se realizó a una densidad de 100 kg/ha, proporcional a una densidad de 0.624 g Las unidades de cultivo utilizadas fueron macetas de polipropileno con una capacidad volumétrica de 12 L. Estas macetas presentaban una configuración troncocónica, con una base superior de 30 cm de diámetro, una base inferior de 20 cm de diámetro y una altura de 25 cm.



Figura 3: Siembra de avena

Riego: Durante el estudio, se aplicó un riego homogéneo en todas las macetas, con el fin de proporcionar un suministro de agua óptimo para el crecimiento vegetal.

Fertilización: Para la fertilización, se empleó solución nutritiva de Steiner, adaptada a un total de 200 L de agua. La composición de esta solución se encuentra especificada en el cuadro número uno.

Cuadro 1: Solución nutritiva Steiner para 200 L de agua.

Solución nutritiva universal Steiner		100%
Ca (NO ₃) ₂	Nitrato de calcio	46.36 g
K NO ₃	Nitrato de potasio	144..57 g
Mg NO ₃	Nitrato de magnesio	54.49 g
Mg SO ₄	Sulfato de magnesio	42.94 g
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico	13.4 ml

Tratamientos y diseños experimental

En el estudio, se implementó un diseño experimental completamente al azar que constaba de seis tratamientos y cinco repeticiones los tratamientos aplicados fueron los siguientes:(T1 = 0 ppm, T2 = 100 ppm, T3 = 200 ppm, T4 = 300 ppm T5 = 400 ppm T6 = 500 ppm).

El en estudio se utilizaron las macetas como unidades experimentales.



Figura 4: Macetas como unidades experimentales

Se utilizó un atomizador para la aplicación de nanopartículas. Cada tratamiento, con su respectiva concentración, fue diluido en 500 ml de agua destilada. La primera aplicación se llevó a cabo 15 días (DDS) y las siguientes se realizaron cada 20 días.

Variables por evaluar

Altura de planta (cm)

Esta medición se llevó a cabo el día 75 en que se recolectó la cosecha.



Figura 5: Altura de plantas del día de la cosecha

Rendimiento forraje verde (t ha⁻¹)

Para evaluar la producción de materia verde, se procedió a segar el área de muestreo y se registró su peso mediante una balanza. Posteriormente, se extrapolo este valor para estimar el rendimiento correspondiente a una hectárea.

$$\text{Rdto de forraje verde} = \frac{\text{kg de FV}}{\text{Area de maceta}} 10,000 \text{ m}^2$$

Rendimiento forraje seco (t ha-1)

Después de la cosecha, las muestras fueron cuidadosamente depositadas en bolsas de papel. Posteriormente, se introdujeron en una estufa de la marca Felisa, donde se sometieron a una temperatura constante de 105°C durante un periodo de 24 h. Una vez transcurrido este tiempo, las muestras se retiraron de la estufa y se procedió a medir su peso utilizando una báscula. El peso resultante de esta medición se empleó para realizar una estimación del rendimiento en una hectárea.

$$Rdto\ de\ Forraje\ Seco = \frac{kg\ de\ FS}{Area\ de\ maceta} 10,000m^2$$

Materia seca

El método proximal, también conocido como análisis proximal o análisis bromatológico, es una técnica utilizada para determinar la composición de los alimentos, incluyendo la materia seca en forrajes como la avena. Este método se basa en la separación y cuantificación de diferentes componentes de la muestra, principalmente la humedad y materia seca.

$$\%Ms = \frac{Peso\ Final - Peso\ Inicial}{G,\ Muestra} \times 100$$

Determinación de cenizas

En este análisis, se emplearon cápsulas de porcelana (crisoles) que habían sido previamente secadas y llevadas a peso constante. Se anotó el peso inicial de cada cápsula. Luego, se añadió una cantidad de muestra que osciló entre 5 y 10 g dentro de cada una de ellas. Las cápsulas fueron introducidas en una mufla, donde se sometieron a una temperatura de 550 °C durante un periodo de cuatro horas. Transcurrido este tiempo, se retiraron las cápsulas y se colocaron en un desecador durante dos horas para su enfriamiento. Finalmente, se procedió a registrar el peso final de las cápsulas.

$$\%Cenizas = \frac{Peso\ Final - Peso\ Inicial}{G, Muestra} \times 100$$



Figura 6: Determinación de cenizas

Fibra Detergente Ácida (FDA)

La medición se llevó a cabo utilizando el método de Van Soest, (Freimar et al,2007) el cual consiste en moler la muestra a tamaño de partícula aproximado de 1 mm, para procesarla muestra se añadieron.50 g y 100 ml de solución detergente ácido al vaso digestor de fibra de 5 a 10 min antes de iniciar la digestión. Se mantiene la digestión por 60 minutos. Posteriormente, la mezcla se retiró y se filtró en un matraz Kitasato mediante un embudo de porcelana Buhner con papel filtro previamente pesado. El residuo se lavó con agua destilada y acetona. Finalmente, el papel de filtro con la fibra se secó en un horno a 100 °C por 12 horas y se procedió a pesar el resultado.

$$\%FDA = \frac{\text{Peso Final} - \text{Peso Inicial}}{G, \text{Muestra}} \times 100$$



Figura 7: Molino de forraje

Fibra Detergente Neutra (FDN)

La cantidad de fibra se determinó mediante el método Van Soest (2007 Freimar) Este procedimiento implicó inicialmente la reducción del tamaño de las partículas de la muestra a aproximadamente de 1 mm, lograda a través de la molienda. Para el procesamiento, se utilizaron 5 g de la muestra, los cuales se combinaron con 100 ml de solución detergente neutro dentro de un vaso de digestión. La mezcla resultante se colocó en un digestor de fibra Labconco. Durante la digestión se añadieron 2 a 5 ml de alfa-amilasa bacteriana termoestable, con una actividad de 340,000 unidades Wohlmeth unidades/ml (modificado) al vaso. Posteriormente, la muestra se filtró utilizando un matraz Kitazato, un embudo busher con papel filtro previamente pesada. El residuo se lavó dos veces, primero con agua destilada y luego con acetona. El papel filtro, junto con la fibra retenida, se secó en una estufa a 100°C durante 16 horas. Después del secado, se colocó en un desecador durante 12 horas, y finalmente, se procedió al pesaje para cuantificar la fibra.

$$FDN = \frac{\text{Peso Final} - \text{Peso Inicial}}{G, \text{Muestra}} \times 100$$



Figura 8: Digestor de fibra labconco

Nitrógeno Total (NT) y Proteína Cruda (PC)

Se determinó mediante el destilador KJELTEC TM de la marca Foss, Modelo 8100 y la siguiente ecuación (Beadstreet,1965).

$$\%N = (V \text{ muestra} - V \text{ blanco})N \text{ ácido} \times 14.007 \times 100$$

V muestra: volumen de HCl para titular la muestra (ml)

V blanco: Volumen de HCl para titular el blanco (ml)

N= normalidad exacta HCl

El resultado del % de NT se multiplica por 6.25 para determinar el % PC.



Figura 9: Equipo KJELTEC TM 8100

Macroelementos

Contenido de fósforo: se determinó por el método de espectrofotometría.

Contenido de potásico: se determinó por el método de digestión con ácido nítrico y ácido perclórico por absorción atómica.

Contenido de magnesio: se determinó por el método de digestión con ácido nítrico y ácido perclórico por absorción atómica.

Contenido de calcio: se determinó por el método de digestión con ácido nítrico y ácido perclórico por absorción atómica.

III. Resultados y Discusión

A partir de las evidencias recabadas en las variables del estudio, se determinó que la aplicación de nanopartículas de hidroxiapatita de calcio ejerce un efecto significativo sobre los parámetros fenológicos y productivos del cultivo de avena. Los datos recopilados se exponen a continuación en el cuadro 2.

Cuadro 2: Resumen estadísticos de las variables analizadas en el cultivo de avena.

Tratamiento	FDN	FDA	PC	MS	REND	Altura
			(%)	(%)	(ton ha ⁻¹)	(cm)
T1	60.96 ^b	29.66 ^a	18.47 ^a	20.52 ^a	12.43 ^b	67 ^a
T2	63.48 ^{ab}	28.30 ^a	19.15 ^a	20.97 ^a	13.99 ^{ab}	66.8 ^a
T3	64.51 ^{ab}	24.69 ^a	19.26 ^a	23.22 ^a	15.79 ^{ab}	65.2 ^a
T4	66.74 ^{ab}	18.88 ^a	19.88 ^a	23.36 ^a	16.02 ^a	63 ^a
T5	68.14 ^a	23.80 ^a	18.82 ^a	19.54 ^a	11.73 ^b	62.4 ^a
T6	61.77 ^b	21.81 ^a	21.13 ^a	19.96 ^a	12.10 ^b	61 ^a

FDN= fibra detergente neutra; FDA= fibra detergente acida, PC=proteína cruda, REND= rendimiento. Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes ($p \geq 0.05$).

FDN Y FDA

Los resultados obtenidos para la fibra detergente neutro (FDN) y la fibra detergente ácido (FDA) muestran variaciones significativas entre los tratamientos aplicados al cultivo de avena.

El contenido de FDN presentó un incremento progresivo desde el tratamiento T1(60.96%) hasta alcanzar su valor máximo en el T5 (68.14%), seguido de una

ligera disminución en el T6 (61.77%). Por su parte, los valores de FDA mostraron una tendencia inversa, con un descenso marcado hacia el T4 (18.88%), para luego repuntar ligeramente en los tratamientos finales.

Aunque autores como (Johnston J, 1999) y (Coblentz WK, 2000) indican que el contenido de fibra aumenta significativamente con la edad de la planta, reduciendo su valor nutricional, los resultados aquí expuestos muestran una reducción de la FDN y FDA hacia el final del ciclo evaluado. Este comportamiento rompe con los rangos típicos reportados para estados de madurez avanzada (50.8–62.4% para FDN y 24.9 – 43.3% para FDA). No obstante, los resultados del presente estudio muestran una tendencia divergente, observándose una disminución en los niveles de FDN y FDA en el tratamiento final (T6), lo cual sugiere una respuesta metabólica distinta a la maduración convencional.

Proteína cruda (PC)

El contenido de proteína cruda registrado en este estudio presentó un rango de variación entre 18.47% y 21.13%. Estos valores resultan excepcionales para la especie *Avena sativa*, la cual comúnmente reporta niveles proteicos de entre 12% y 15% en etapas intermedias de crecimiento. El pico máximo de nitrógeno total se observó en el T6 (21.13%) mientras que el valor más bajo se encontró en el T1 (18.47%).

Al contrastar los resultados de esta investigación con el siguiente autor (Salmerón Z J J, 2003), se evidencia una mejora sustancial en el perfil proteico del forraje. Según dicho autor, las variedades de avena en etapas de madurez fisiológica (MF) promedia un 10.7% de PC, una cifra que superan el 9.6% característico de

variedades antiguas como Guelatao y Tarahumara, pero que se mantiene significativamente por debajo de los niveles registrados en el presente estudio, los cuales oscilaron 18.47% y 21.13%.

Específicamente, la variedad Cuauhtémoc ha sido históricamente valorada por su aporte de 11.3% a 11.5% de PC (Salmerón Z J J, 2003), sin embargo, los datos obtenidos en este ensayo demuestran que, bajo el manejo de nHAp, es posible duplicar este aporte proteico, alcanzando un valor de 21.13% en el T6. Este hallazgo es vital importancia para la región.

Altura de planta y materia seca

La altura de planta mostro una tendencia decreciente conforme aumentó la concentración de nHAp, iniciando en 67 cm (0 mg L^{-1}) y descendiendo hasta 61 cm (500 mg L^{-1}). A pesar de esta reducción en la altura, el porcentaje de materia seca alcanzó sus niveles máximos en las dosis de 200 y 300 mg L^{-1} , con valores de 23.22% y 23.36% respectivamente.

La materia seca en este estudio demuestra una eficiencia biológica excepcional, particularmente al considerar la precocidad del cultivo. Mientras que (Pedro Díaz et al 2018) describe incrementos del 20.63% en la biomasa entre los días 105 y 115 para alcanzar rendimientos $11.43 \text{ ton ha}^{-1}$, los resultados de esta investigación superaron dicho umbral en un ciclo significativo más corto.

Rendimiento (ton ha^{-1})

Se observo un incremento significativo en las dosis de 200 mg L^{-1} ($15.79 \text{ ton ha}^{-1}$) y 300 mg L^{-1} ($16.02 \text{ ton ha}^{-1}$), superando notablemente al registro $12.43 \text{ ton ha}^{-1}$.

Los resultados obtenidos superan los patrones de crecimiento reportados por la (FAO 2004) y (Johnston et al 1999), quien establecen que la transición fenológica hacia la madurez masosa (MAS) induce incrementos de biomasa de hasta un 110% respecto al estado de embuche. En contraste, el presente estudio registro una respuesta productiva superior con un aumento de 150%.

Este comportamiento ratifica que el manejo nutricional implementado, especialmente en las dosis 200 y 300 mg L⁻¹ de nHAp, optimizo la tasa de asimilación de carbono, permitiendo alcanzar un techo 16.02 ton ha⁻¹. Tal hallazgo demuestra una eficiencia biológica significativamente mayor al promedio documentado para cereales.

Macroelementos (P, Ca, Mg y K)

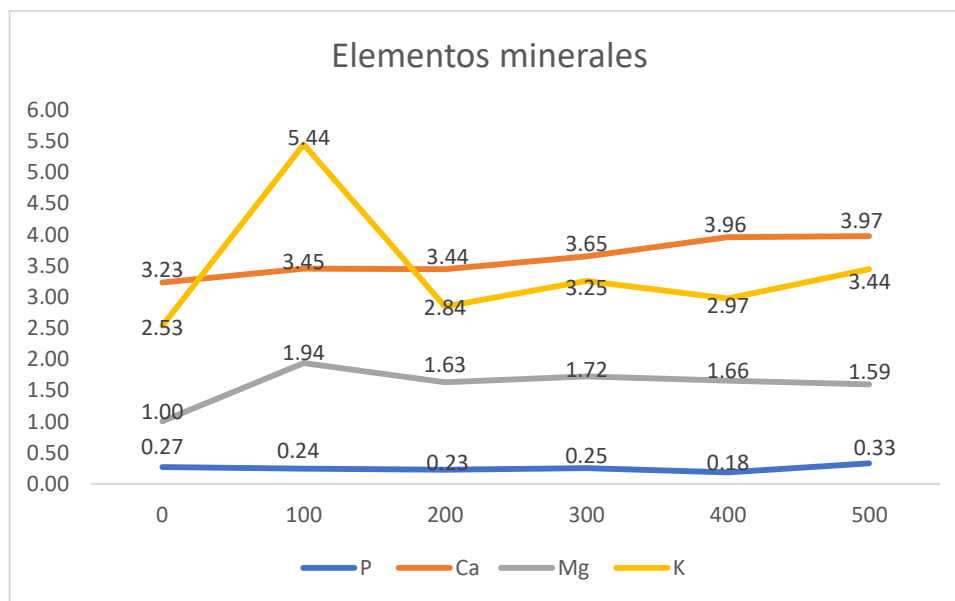


figura 10: Elementos minerales, P = Fósforo, Ca = Calcio, Mg = Magnesio, K= Potasio

La suplementación con nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) generó una dinámica de absorción de nutrientes específica, impactando la homeostasis mineral de la planta y, por ende, su valor nutricional para el ganado.

Fósforo (P) y Calcio (Ca)

El contenido de P se mantuvo relativamente estable, con una ligera disminución en las dosis de 400 mg L⁻¹(0.18%) y un repunte en la dosis de 500 mg L⁻¹(0.33%). Por su parte, el Calcio (Ca) mostró un incremento sostenido conforme aumentó la dosis de nHAp, alcanzando su punto máximo en el 500 mg L⁻¹ con 3.97%.

El perfil mineral del forraje bajo la influencia de nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) demuestra una eficiencia de absorción significativamente superior a los registros convencionales. Mientras que (Condori-Quispe, 2019) reporta concentraciones de Calcio entre 0.62 y 1.00 g/k (0.06%-0.10%), este estudio alcanzó niveles de hasta 3.97 %, superando en casi 40 veces el umbral máximo citado.

En cuanto el Fósforo, los niveles basados en (Condori-Quispe, 2019), muestran una tendencia decreciente (0.61 a 0.46 g/kg), (0.61 a 0.46 g/kg), mientras que los tratamientos con nHAp mantuvieron una estabilidad superior con valores de 1.8 a 3.3 g/k (0.18%-0.33%).

Magnesio (Mg) y Potasio (K)

El Magnesio (Mg) presentó su mayor concentración en las dosis 100 mg L⁻¹(1.94%), descendiendo y estabilizándose en niveles cercanos a 1.60 % en las dosis superiores. El Potasio (K), por el contrario, mostró una fluctuación marcada, con un pico sobresaliente de 5.44% en la dosis de 100 mg L⁻¹, seguido de una estabilización en torno al 3.0%.

Mientas que (José Domingo, 2022) reporta concentraciones de 0.20% para Magnesio y 0.38% para Potasio, los resultados de este estudio demuestran que utilización de nHAp es significativamente superior.

IV. Conclusiones

Los resultados del presente estudio evidencian que la aplicación foliar de nanopartículas de hidroxiapatita de calcio (nHAp) constituye una estrategia efectiva para mejorar la calidad nutricional, el rendimiento y la composición mineral del cultivo de avena. Se observó una respuesta diferenciada según la dosis aplicada, destacando especialmente las concentraciones de 200 y 300 mg L⁻¹, las cuales optimizaron la producción de materia seca y el rendimiento por hectárea, superando valores comúnmente reportados en condiciones convencionales. Asimismo, la reducción de FDN y FDA en tratamientos específicos sugiere una mejora en la digestibilidad del forraje, mientras que el incremento en proteína cruda, con valores superiores al promedio histórico para Avena sativa, refleja un impacto positivo en el valor nutritivo destinado a la alimentación animal. En cuanto al perfil mineral, la suplementación con nHAp favoreció particularmente la acumulación de calcio y mantuvo niveles adecuados de fósforo, magnesio y potasio, contribuyendo al equilibrio nutricional del cultivo.

V. Bibliografía

- AAG., A. (2015). *Estudio de la fenología, rendimiento forrajero, y valor nutritivo de dos variedades de avena (Mantaro 15 y Criolla) en los C.E. UNDAC, Pánuco y Huayllay*. Tesis de ingeniero Zootecnista. Pasco, Perú: Univ. Nacional. Daniel Alcides Carrión.
- Alex Bach, & S. (2006). La fibra en los rumiantes: ¿Química o física? *Universidad Autónoma de Barcelona*.
- Atha, D., Wang, H., Petersen, E., Cleveland, D., Holbrook, R., Jaruga, P., . . . Nelson, B. (2012). Copperoxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environ. Sci. Technol.*, 1819–1827. doi:<https://doi.org/10.1021/es202660k>
- Babu S, S. R. (2022). *Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability*. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133451.
- Barman M, M. R. (2022). *Advances in micronutrient fertilizer production and efficacy in plant nutrition*. New York, EEUU.: Apple Academic Press.
- Barrett, E., Brown, J., & Oleck, S. (1951). . *Some granular carbonaceous adsorbents for sugar refining*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- Beadstreet, E. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *SCIENCE*, 339-346.
- Bratovic A, H. W.-A. (2021). *Nanopesticides and nanofertilizers and agricultural development: scopes, advances and applications*. Open Journal of Ecology.
- Carpenter. (2017). Diferencias entre una fibra detergente ácida y una fibra detergente neutra. *ehow en español*. Obtenido de

https://www.ehowenespanol.com/diferencias-fibra-detergente-acida-fibra-detergente-neutra-info_279593/

Coblentz W K, K. P. (2000). Effect of maturity on degradation kinetics of sod-seeded cereal grain forage grown in Northern Arkansas.

Condori-Quispe, R. L.-M.-N.-A. (2019). Calidad del ensilaje de avena forrajera (*Avena sativa* L.) cosechado en tres diferentes tipos de silos artesanales. *Journal of the Selva Andina Animal Science*.

Daniel Villazón Bustillos, H. R. (2017). Pronóstico productivo de la avena forrajera de temporal por efecto del cambio climático en el noroeste de Chihuahua, México. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 551-567.

Delfani, M. B. (2014). Algunas respuestas fisiológicas del guisante de ojo negro a los nanofertilizantes de hierro y magnesio. *Comunicaciones en Ciencia del Suelo y Análisis de Plantas*, 530-540. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>

Erika Evelin Ramírez-Ramírez, J. H.-E.-M.-M.-S.-H. (2023). GENÉTICA DE LA RESISTENCIA A ROYA DEL TALLO CAUSADA POR. 237-244.

FAO. (2004). Avena para forraje. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.*, 33.

Flores Hernández, E. A. (2020). Síntesis y caracterización de nanopartículas de hidroxiapatita con potencial uso como nano fertilizante. *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*.

Flores-Hernández, E. A.-S.-O.-A.-L.-B.-c.-T.-C. (2020). Synthesis and characterization of calcium phosphate nanoparticles and affect of the

- agitation type on particles morphology. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 285-298. doi:<https://doi.org/10.24275/rmiq/Mat523>
- Freimar SEGURA S, R. E. (2007). DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN ACERCA DE LOS MÉTODOS . *REVISTA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA FARMACÉUTICA*, 72-81.
- GIL, H. G. (2014). IMPACTO DEL SISTEMA DE LABRANZA Y DISPONIBILIDAD DE . *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.
- Goswami, P. Y. (2019). Efectos positivos y negativos de las nanopartículas en las plantas y sus aplicaciones en la agricultura. *Ciencia de las Plantas Hoy*, 232–242. doi:<https://doi.org/10.14719/pst.2019.6.2.502>
- Granados, J. (2010). Bioquímica metabólica. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD*.
- Hossain, Z., Mustafa, G., & Komatsu, S. (2015). Plant responses to nanoparticle stress. doi:10.3390/ijms161125980
- Johnston J, B. W. (1999). Producción forrajera a partir de cereales de primavera y mezclas de cereales y guisantes. *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Asuntos Rurales.*, 120. Obtenido de www.omafra.gov.on.ca/english/products/fieldcrops.html#forage
- José Domingo, E. c. (2022). Cultivo y ensilaje de avena (*Avena sativa* L.) en el trópico alto del departamento de Nariño. *Corporación colobiana de investigación agropecuaria* .
- Liu X, Z. F. (2004). Responses of peanut to nano-calcium carbonate. *Plant Nutr Fertil*, 385-389.

- Liu, R. L. (2014). Nanopartículas sintéticas de apatita como fertilizante de fósforo para soja (*Glycine max*). doi:<https://doi.org/10.1038/srep05686>
- Loayza, C. (2016). Eficiencia agronómica del nitrógeno en el cultivo de avena forrajera (avena. *Universidad central del ecuador*. doi:<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/10127/1/T-UCE-0004-87.pdf>.
- Lu, C. M. (2002). *Research on the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism*. *Soybean Sci* 21:68–172.
- Márquez, B. M. (2014). cenizas y grasas. *Universidad Nacional De San Agustín*. .
- Meléndez. (21 de octubre de 2015). Las bases para entender un análisis nutricional de alimentos y su. *El Mercurio*. Obtenido de <http://www.elmercurio.com/campo/noticias/analisis/2015/10/21las-base-para-entender-un-analisis-nutricional-de-alimentos-y-su-nomenclatura.apsx>
- Mendoza, G. R.-L. (enero-junio de 2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*, 161-186. Recuperado el 22 de Agosto de 2024, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11502906>
- Mora, D. (24 de abril de 2012). *Engormix*. Obtenido de Engormix: https://www.engormix.com/ganaderia/pasto-corte/manera-analizan-pastos-finca_a29379/
- Moschini, E., Gualtieri, M., Colombo, M., Fascio, U., Camatini, M., & Mantecca, P. (2013). The modality of cell–particle interactions drivesthe toxicity of nanosized CuO and TiO₂in human alveolar epithelial cells. *Toxicol*, 102–116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2013.07.019>

Noreña, J. (2017). La importancia de la fibra efectiva en la alimentación del ganado.

Contexto ganadero. Obtenido de

<https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/la-importancia-de-la-fibra-efectiva-en-la-alimentacion-del-ganado>

PEDRO DÍAZ VILLAMIL, M. P. (2018). EVALUACION DEL RENDIMIENTO PRODUCTIVO Y VALOR NUTRICIONAL DE LA AVENA FORRAJERA (avena sativa) EN DOS ESTADOS DE MADURACIÓN . *UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)* .

PEDRO DÍAZ VILLAMIL, M. P. (2018). EVALUACION DEL RENDIMIENTO PRODUCTIVO Y VALOR NUTRICIONAL DE LA AVENA FORRAJERA (avena sativa) EN DOS ESTADOS DE MADURACIÓN DIFERENTES, EN LA VEREDA EL GAITAL DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ SANTANDER . *ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE* .

Reyes-Gasga, M. V.-G. (2006). LA HIDROXIAPATITA, SU IMPORTANCIA EN LOS TEJIDOS. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 9, 90-95.

Ricardo A. Sánchez Gutiérrez, H. G. (2014). Producción y calidad de forraje de variedades de. *Rev Mex Cienc Pecu*, 131-142.

Salmerón Z J J, F. J. (2003). Variedades de avena y calidad nutricional del forraje. *CESICH-CIRNOC-INIFAP-SAGARPA*.

Stampoulis, D. K. (2009). *ssay- de-pendent phytotoxicity of nanoparticles to plants*. *Environ. Sci. Technol.* 43: 9473-9479.

Yang, F. C. (2007). *The improvement of spinach growth by nano-anatase TiO₂ treatment is related to nitrogen photore-duction*. *Biol. Trace Elem. Res.* 119: 77-88.

Zahra, Z. H. (2022). Overview on Recent Developments in the Design, Application, and Impacts of Nanofertilizers in Agriculture. *Sustainability* (2071-1050).
Obtenido de <https://doi.org/10.3390/su14159397>