USO DE TECNOLOGÍAS INNOVADORAS EN EL AGRO: NANOPARTICULAS DE ZnO COMO BIOESTIMULANTES PARA EL MANEJO AGROECOLÓGICO DE TRIGO Y CEBADA

ALUMNO: Lucas Friedlmeier

DIRECTORES:

Dra. Ing. Agr Analía Perelló- Pontificia Universidad Católica Argentina(UCA)-FICA Facultad de Ingeniería y Cs Agrarias, CABA.

Dra. Verónica Fabiana Consolo-Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Biotecnología (INBIOTEC-CONICET), Fundación para Investigaciones Biológicas Aplicadas (FIBA), Mar del Plata, Pcia de Buenos Aires.

INDICE

Resumen---------- pág. 3

Introducción---------- pág. 3

Materiales y métodos--------pág. 5

Resultados----------pág. 7

Discusión----------pág. 14

Conclusión----------pág. 15

Bibliografia----------pág. 16

Anexos----------pág. 18

FIGURAS

Figura 1: % de germinación del trigo para cada tratamiento----------pág. 8

Figura 2: % de germinación de cebada para cada tratamiento---------- pág. 8

Figura 3: Longitud radicular en trigo----------pág. 9

Figuras 4 y 5: Comparación de longitud radicular en trigo---------- pág. 9

Figura 6: Longitud radicular en cebada---------- pág. 10

Figura 7 y 8: Comparación de la longitud radicular en cebada---------- pág. 10

Figura 9: Longitud aérea en trigo---------- pág. 11

Figura 10: Longitud aérea en cebada----------pág.11

Figura 11: Contenido de clorofila en cebada y trigo---------- pág. 12

Figura 12: Comparación de Peso fresco/seco en trigo---------- pág. 13

Figura 13: Comparación de Peso fresco/seco en cebada---------- pág. 13

ANEXOS

Anexo 1: Longitud de plántulas de cebada---------- pág. 18

Anexo 2: Longitud de plántulas de trigo---------- pág. 19

Anexo 3: Longitud radicular de cebada---------- pág. 20

Anexo 4: Longitud de radicular de trigo---------- pág. 21

Anexo 5: Contenido de clorofila en cebada---------- pág. 22

Anexo 6: Contenido de clorofila en trigo---------- pág. 24

RESUMEN

Este trabajo reporta la efectividad biológica de nanopartículas (NPs) de óxido de zinc (ZnO) en cultivos de trigo y cebada, aplicadas por pelleteado en granos. Las nanopartículas son transportadas tanto desde su penetración por semillas o por aperturas estomáticas del follaje, pudiendo incrementar la actividad metabólica celular y translocación de los fotosintetatos en forma significativa, logrando promover el crecimiento de los cultivos de una manera efectiva. La aplicación de bionanopartículas en el agro constituye además una herramienta amigable, orientada a lograr máximos rendimientos de los cultivos, con mínimas dosis de compuestos, resultando en una producción más respetuosa con el medio ambiente. Se emplearon mediante el pelleteado de semillas de trigo y cebada dos dosis de las NPs de ZnO, una baja de 100 ppm y una alta de 500 ppm, y se compararon sus efectos con un testigo. Los resultados evidenciaron un incremento significativo en parámetros morfométricos tales como la velocidad germinativa, altura de la planta y longitud radicular, vigor y actividad fisiológica medida por aumento en el contenido de clorofila y peso de las plantas en los tratamientos que recibieron las NPs respecto a los controles sin tratar, dependiendo del cultivo y dosis aplicada. Esto demuestra su potencial para mejorar de manera sustentable el rendimiento y productividad de cultivos agrícolas a campo. La aplicación de NPs mediante el pelleteado de los granos tuvo una respuesta variable según la combinación del cultivo y la dosis empleada, respecto a los testigos.

INTRODUCCIÓN

Los cereales de invierno, principalmente trigo y cebada, tienen gran importancia en nuestro país y en la agricultura a nivel mundial formando gran parte de las rotaciones con maíz, soja y girasol. El trigo (*Triticum aestivum*) representa una de las producciones más importantes de la Argentina, siendo el principal cultivo de invierno y el tercer producto más sembrado en el país con 6.000.000 de hectáreas y una producción anual que en promedio suele llegar a las 18 MTn, exceptuando el año pasado que fue menor por la sequía. La cadena de este cultivo destaca en el conjunto de cadenas agroindustriales como una de las de mayor impacto socio-económico a nivel nacional (Sigaudo *et al*., 2021). Con respecto a la cebada (*Hordeum vulgare*), existen dos tipos, la cebada forrajera que tiene una espiga de 6 hileras (*Hordeum hexastichon)* y la de dos hileras que es la cebada cervecera (*Hordeum distichum*). La superficie destinada a la forrajera es muy reducida y no presenta tanta importancia comparada con la cervecera. La cebada cervecera tiene una producción mucho menor a la del trigo, sin embargo, es un cultivo que cada vez va tomando más importancia en el país, principalmente porque permite una cosecha anticipada a la del trigo y así sembrar en fecha optima la soja de segunda. El cultivo tiene una producción anual que ronda 5 MTn y una superficie sembrada de 1.200.000 hectáreas (Bolsa de Cereales PAS, 2023).

En los últimos 10 años en el ámbito agrícola está tomando relevancia el uso de nuevas tecnologías a escala nanométrica como herramientas para el diseño de nanopesticidas, nanorecubrimientos y nanofertilizantes entre otros. Las nanoparticulas (NPs) metálicas o de óxidos metálicos tienen un tamaño muy

pequeño (aproximadamente de 100 nM), una alta relación área superficial/volumen, gran cantidad de sitios reactivos, alta actividad catalítica, alta estabilidad, y eficiencia de adsorción, por lo que pueden actuar en conjunto con otros fertilizantes para mejorar la eficiencia de producción reduciendo la cantidad de los químicos convencionales introducidos en el ambiente (Abdul Haafez *et al*., 2015). Además, presentan actividad antifúngica por lo que se pueden utilizar para inducir resistencia a algunas enfermedades que afectan a los cultivos. Por otra parte, también pueden ser utilizadas a dosis mínimas como estimulantes de crecimiento para el desarrollo de plantas siendo más efectivos que los productos químicos convencionales evitando el exceso de productos tóxicos en el medioambiente. Se ha demostrado que las semillas de trigo y cebada tratadas con NPs muestran una mejora en la germinación, el uso eficiente de nutrientes, actividad fotosintética, calidad de grano y un mayor rendimiento (Santas *et al*., 2023).

Por otra parte, la literatura describe que las NPs metálicas y de óxidos metálicos pueden actuar tanto como biofungicidas o promotores en el desarrollo de plantas. Estas NPs tienen además un efecto positivo en diversos procesos fisiológicos que permite un mayor crecimiento de la raíz (Zunun, 2023). Las NPs aumentan la actividad de ciertas enzimas, como las fitasas, que contribuyen a la solubilización del fosforo orgánico, por ende, aumentan la absorción de este por la planta y por eso un mayor crecimiento radicular (Méndez *et al*., 2016).

Las NPs pueden ser absorbidas por casi toda la superficie de la planta. A través de las hojas ingresan por los poros de la epidermis, son tomadas también por las raíces primarias y por áreas dañadas. Una vez absorbidas por la planta pueden ser transportadas vía simplasto y apoplasto, y se mueven entre los tejidos por la xilema y el floema (Gabor Feigl, 2023).

Particularmente, se ha descripto que las NPs de ZnO favorecen a algunos cultivos a soportar mejor las condiciones de sequía ya que tienen un efecto positivo en el balance pro-oxidativo/anti oxidativo de la planta. Esto se ha visto reflejado en cambios en la proporción de clorofila y en un aumento en el contenido de carotenos en plantas (Taran N., Storozhenko V., Svietlova, 2017).

En este sentido, el zinc es un micronutriente esencial para el crecimiento de los cultivos, requerido en muchos procesos fisiológicos y bioquímicos como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas, en el mantenimiento estructural y funcional de las membranas biológicas. Cuando es aplicado en forma de NPs en estos cultivos tiene un efecto positivo en la producción de clorofila, por ende, también en la fotosíntesis, además incrementa la velocidad de germinación, la producción de polen y la biomasa (Munir *et al*., 2018).

La población mundial tiene una deficiencia de Zn, lo cual es grave por la importancia que tiene en coordinar la respuesta inmune. Esta deficiencia se debe a que aproximadamente el 35% de la población se alimenta de trigo, el cual es bajo en Zn. Por ende, el uso de las NPs de ZnO puede ayudar a solucionar esta situación (Wei Du *et al*., 2019). La aplicación como fertilizante no es tan efectiva por su falta de solubilidad en el suelo, pero las NPs de ZnO por su alta reactividad, tienen la ventaja de ser más solubles y estarán más disponibles para la planta (Prabha Rai-Kalal, Anjana Jajoo, 2021).

Las NPs a utilizar en los ensayos experimentales de este trabajo final, fueron obtenidas en el laboratorio INBIOTEC por medio de síntesis biológica a partir de una cepa del hongo *Trichoderma harzianum*, un hongo que por si solo se está empleando en la agricultura por sus efectos como biocontrolador y en la promoción del crecimiento de los cultivos gracias al aumento de solubilización de fosfatos y micronutrientes (Altomare *et al*., 1999). Las NP sintetizadas provistas fueron las de óxido de zinc. En este trabajo se evaluó el efecto de NPs de ZnO como promotoras del crecimiento vegetativo en trigo y cebada. La ventaja que tienen estas NPs al ser sintetizadas de forma biológica, llamada “síntesis verde”, dado que su producción en masa resulta más económica y amigable con el medio ambiente y por lo tanto contribuyen a una producción sustentable.

Dados los resultados preliminares promisorios iniciados por el grupo de trabajo de los tutores (Gallo *et al*., 2024), se planteó como objetivo de este trabajo final, experimentar en ensayos “in vitro” y bajo condiciones controladas, el efecto bioestimulador de NPs de ZnO en el crecimiento y desarrollo de plántulas de trigo y cebada durante etapas tempranas de su crecimiento vegetativo.

De esta manera, se busca contribuir a la innovación y generación de tecnología para el agro en el contexto de una producción sustentable con el medioambiente.

Objetivo general: Evaluar los efectos que tiene el uso de Nps de ZnO en la germinación y promoción del crecimiento en los primeros estadios de los cultivos de trigo y cebada.

Objetivos específicos:

- Evaluar los efectos de las NPs de ZnO en la germinación del cultivo de cebada y de trigo.
- Evaluar el efecto de las NPs de ZnO en la promoción del crecimiento de cultivos de trigo y cebada durante los primeros estadios de crecimiento de los cultivos.
- Comparar el efecto que tiene una dosis baja (100 ppm) y una dosis alta (500 ppm) de NPs de ZnO con un testigo para determinar si existen diferencias entre los tratamientos, y entre ellos y el testigo sin tratar.

Palabras clave: nanoparticulas, biotecnología, trigo, cebada, cereales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las NPs de ZnO fueron propiciadas por el INBIOTEC Mar del Plata, obtenidas por mico síntesis a partir del hongo *Trichoderma harzianum* (Consolo *et al*., 2020).

Se aplicaron en dos variedades comerciales de uso actual de los siguientes cultivos, trigo y cebada.

La variedad utilizada en cebada fue Montoya y en trigo, Algarrobo Don Mario, que es de un ciclo intermedio.

Se evaluó el efecto de NPs de ZnO aplicadas en dos dosis contrastantes, baja concentración (100 ppm) y alta concentración (500 ppm) a juzgar por ensayos

preliminares y bajo una modalidad de aplicación llamada peleteado de granos que consiste en recubrir los mismos con agar agua en mezcla con la suspensión de Nps de ZnO a la dosis indicada. Las NPs fueron previamente pesadas en balanza de precisión para obtener las concentraciones indicadas en ppm, y la suspensión acuosa obtenida fue sonicada como sonicador durante 20 min antes de su aplicación en los granos.

Se analizó su efecto considerando como variables la germinación de las semillas y la promoción del crecimiento y desarrollo de plántulas en estadíos tempranos del crecimiento vegetativo (1 mes de edad) calculado como vigor. Se evaluó también como parámetro fisiológico el contenido de clorofila, medido con SPAD.

Se realizaron 2 tipos de ensayos bajo condiciones controladas, ambos realizados en las instalaciones del Lab de Producción Vegetal de FICA UCA, a saber:

1. **Bioensayos utilizando la técnica del Rolled Paper (ISTA)**

Se realizó como bioensayo exploratorio para ajustar la técnica y las dosis a emplear de las NPs, siguiendo las indicaciones de la Asociación Internacional para el test de Semillas (ISTA). La técnica consiste en disponer los granos tratados sobre hojas de papel de filtro humedecido, tapar con nuevas hojas de papel, depositar en bolsas Ziploc para mantener la humedad y mantener bajo condiciones controladas de luz y temperatura (cámara de crecimiento) hasta el momento de su evaluación.

2. **Ensayos en macetas**

Se realizó un ensayo en macetas plásticas de 1 kg de capacidad conteniendo una mezcla de tierra comercial + perlita + vermiculita disponiendo 2 semillas/plántulas x maceta y 10 macetas x repetición con un total de 6 tratamientos. Se mantuvieron bajo condiciones de Laboratorio en el lab. De Producción Vegetal de FICA-UCA.
Los tratamientos a considerar fueron los siguientes:
Controles
Trigo (C)
Cebada(C)
Trigo + 100 ppm NPs de ZnO
Trigo + 500 ppm NPs de ZnO
Cebada + 100 ppm NPs de ZnO
Cebada + 500 ppm NPs de ZnO

Procedimiento para agregar las NPsZnO a las semillas

Se pesaron 0,019 g (100 ppm) y 0,101 g (500 ppm) dosis baja y alta de NPs de ZnO; se agregó 1 ml de ADE; se sónico 1 min a 20 % amplitud. Luego se mezclaron 50 ml Agar Agua (AA) 1% +Nps 50 1ml ADE+ 50 granos de trigo y cebada respectivamente. Idem control 50 granos trigo (solo AA) y 50 granos cebada (solo AA). En cada tratamiento, se procedió a agitar con agitador magnético 15 min aprox. Finalmente los granos tratados fueron depositados en bandejas/ cajas de Petri y puestos a pre germinar 2-4 días en oscuridad. Se efectuaron observaciones diarias y se realizaron las mediciones indicadas a continuación.

Parámetros e indicadores evaluados

Las variables a medir fueron las siguientes: % de germinación, velocidad de germinación, altura de la parte aérea (cm), longitud de la raíz principal (cm), número de hojas desarrolladas y peso fresco y seco de plántulas (gr). Se consideró además el índice de verdor (clorofila) y se calculó el vigor final con la siguiente fórmula:

Índice de vigor (Abdul-Baki and Anderson ,1973):

IV= (LR+LB) x PG

Donde, IV es el índice de vigor; LR longitud radicular (cm); LB longitud del brote o parte aérea (cm) y PG porcentaje de germinación.

El % de germinación tiene en cuenta el número de semillas germinadas del total que fueron sembradas (las germinadas son las que tienen una radícula mayor a 2 mm).

PG (%) = (N° semillas germinadas / N° semillas sembradas) * 100

Las variables se analizaron entre el momento de germinación y los 30 días después de sembradas las plantas (dds) para evaluar su etapa fisiológica vegetativa.

Se compararon los testigos (controles) con todos los tratamientos y se evaluó la eficacia de las NPs y de la técnica ensayada (pelleteado de granos).

Análisis de datos

Análisis de varianza. Para contrastar la hipótesis de igualdad de medias poblacionales entre los distintos tratamientos, para cada variable se ajustó un análisis de varianza, con un nivel de significación (α) igual a 0,05/Tukey. Para cada modelo ajustado se comprobaron los supuestos mediante gráficos diagnósticos (cuantiles de términos del error, gráfico de residuos y gráfico de residuos vs predichos). En las variables donde existieron diferencias significativas entre tratamientos se realizó una prueba de separación de medias con el procedimiento de la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher/Tukey con un nivel de significación (α) igual a 0,05 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

Resultados

1) **Efecto de NPs de ZnO en la germinación de semillas**
   A) **Trigo**
   En granos de trigo, ya desde el inicio de la germinación, se observa el efecto benéfico de la dosis baja de NPs de ZnO, de 100 ppm, respecto a la dosis alta y el control, efecto que se mantuvo hasta las 72 hs de observación en que los valores fueron similares, pero con una ventaja comparativa bajo la aplicación de la dosis baja de NPs a los granos.

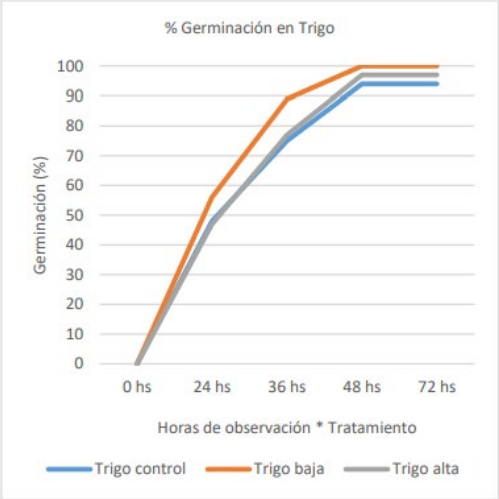


Figura 1: % de germinación del trigo para cada tratamiento, en función de las horas transcurridas desde la siembra.

B) Cebada

El mismo patrón de la tendencia observada en trigo, fue observado en granos de cebada tratados y sin tratar con NPs de ZnO en dosis bajas y altas. En este caso la brecha de diferencia a favor de las semillas tratadas con NPs de ZnO respecto a la cebada control fue mayor que en el caso del trigo (Figura 2).

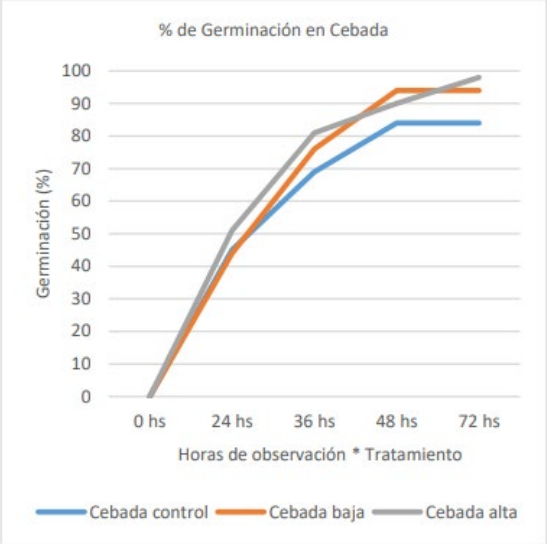


Figura 2: % de germinación de cebada para cada tratamiento, en función de las horas transcurridas desde la siembra.

2) Efecto de NPs de ZnO en la longitud y el número de raíces

A) Trigo

Tal como se observa en las figuras 3, 4 y 5, a los 30 dds hubo un incremento significativo del desarrollo radicular con ambas dosis de aplicación de las NPs de ZnO respecto a los controles.

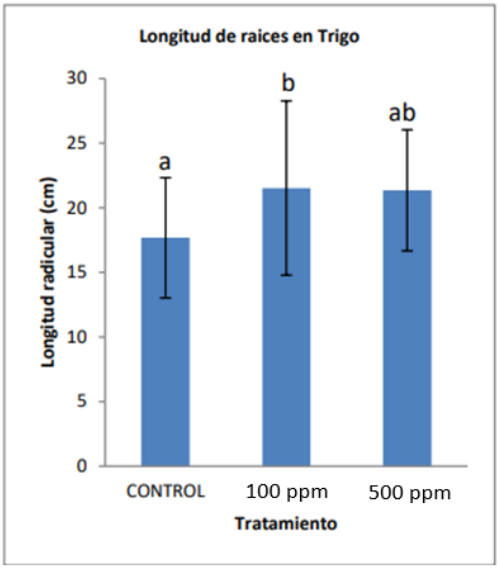


Figura 3: Longitud radicular en trigo. Las barras representan la media para cada tratamiento.

Figura 4 Figura 5

Figuras 4 y 5: Comparación de la longitud radicular del trigo. En la figura 4 se ve a la izquierda el control y a la derecha el desarrollo de las plantas tratadas con la dosis con 500 ppm. En la figura 5 también se ve a la izquierda el control y a la derecha la respuesta al tratamiento con 100 ppm.

B) Cebada

Al evaluar la longitud radicular en las plántulas de cebada, se observaron diferencias significativas de ambas dosis (baja, de 100ppm y alta, de 500ppm) con respecto al tratamiento control, sin observarse diferencias significativas entre dosis (Figura 6). Las Figuras 7 y 8 ilustran las diferencias de los tratamientos de NPs de ZnO en las plántulas de cebada. En el caso de la figura 7 se ve a la izquierda el tratamiento con la aplicación de dosis baja (100 ppm) y a la derecha el control. En la figura 8 se ve a la izquierda el control y a la derecha la respuesta ante la dosis baja. Ambas

figuras muestran el mayor desarrollo radicular con las NPs de ZnO con respecto al testigo.

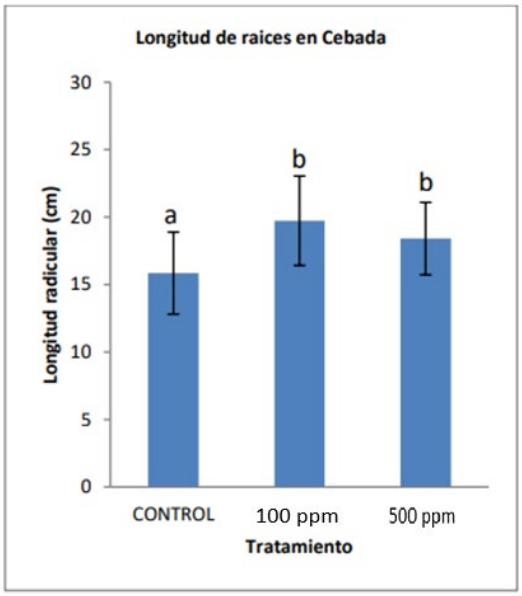


Figura 6: Longitud radicular en cebada, las barras representan la media para cada tratamiento.

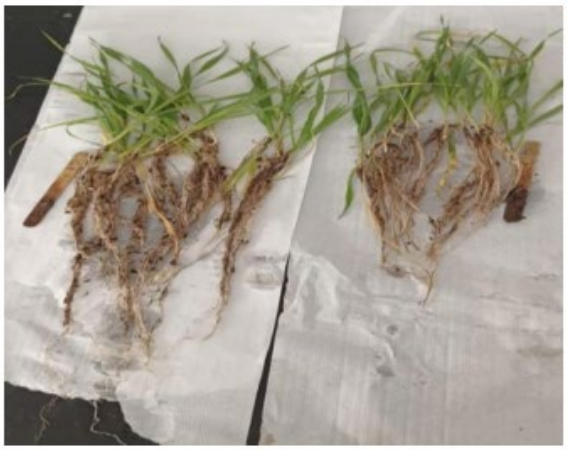


Figura 7 Figura 8

Figura 7 y 8: Comparación de la longitud radicular en cebada. En la figura 7 se ve a la izquierda el tratamiento con la dosis con 100 ppm y a la derecha el control. En la figura 8 se ve a la izquierda el control y a la derecha la respuesta a la aplicación de la dosis de 100 ppm.

3) Efecto de las NPs de ZnO en la altura de las plantas.

A) Trigo

La altura de las plántulas a los 30 dds se vio estimulada favorablemente con la aplicación de ambas dosis de NPs de ZnO, destacándose especialmente la aplicación de dosis baja de 100 ppm por encima de la dosis de 500 ppm (Figura 9).

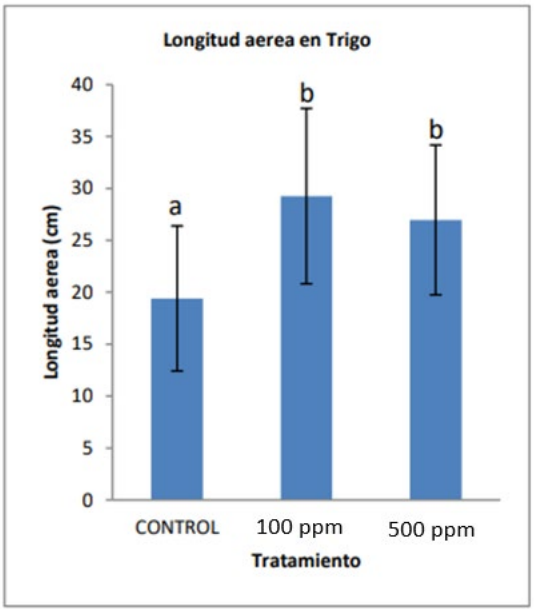


Figura 9: Longitud aérea en trigo, las barras representan la media para cada tratamiento.

B) Cebada

Similares resultados a los observados en trigo, fueron encontrados para las plántulas de cebada, la dosis de 100 ppm produjo mejores resultados que la dosis de 500 ppm, aunque ambas indujeron una respuesta significativamente superior respecto a los valores arrojados por estuvieron por el control (Figura 10).

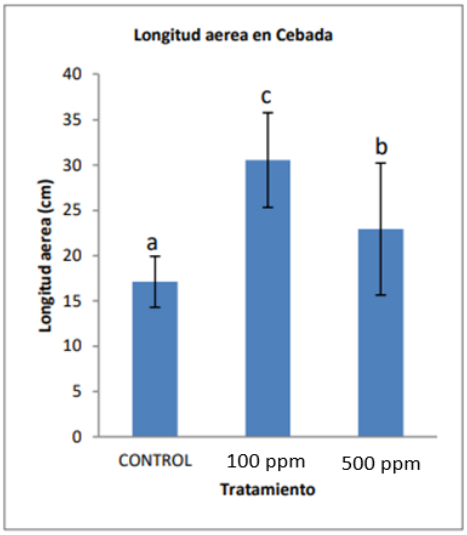


Figura 10: Longitud aérea en cebada. Las barras representan la media para cada tratamiento.

4) Contenido de clorofila en cebada y trigo

A) Trigo

Respecto al trigo, la dosis alta no tuvo efectos positivos respecto al control; en cambio, la aplicación de la dosis baja de 100 ppm produjo valores

significativamente superiores en cuanto al contenido de clorofila comparando ambas. Figura 11

B) Cebada

En el caso de la cebada ambas dosis aumentaron significativamente el contenido de clorofila respecto al testigo. Sin embargo, la dosis baja (de 100 ppm) mostro mejores resultados. Figura 11

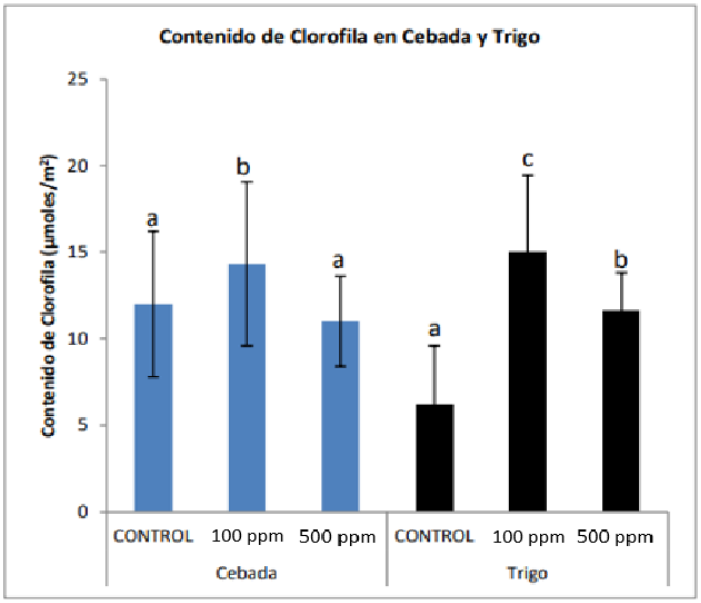


Figura 11: Contenido de clorofila en cebada y trigo, las barras representan la media para cada tratamiento.

5) Peso fresco y peso seco de las plantas

A) **Trigo**

En trigo los resultados analizados indicaron que, para el peso fresco radicular, si bien ambas dosis ejercieron un efecto favorable respecto a los valores arrojados por el control, se destaca, en particular, la dosis baja. En el caso del peso fresco de la parte aérea de las plantas de trigo, si bien ambas dosis también ejercieron un efecto positivo incrementando este parámetro, las diferencias no fueron tan evidentes como lo observado para las raíces. Respecto al peso seco, no hubo diferencias significativas respecto a los controles. Figura 12

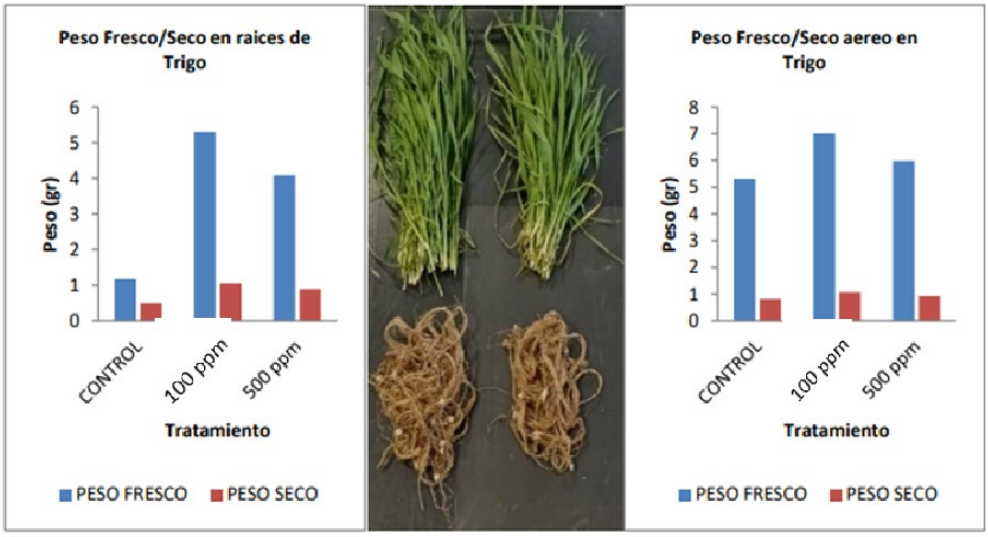


Figura 12: Comparación de Peso fresco/seco en raíces y en la parte aérea de plántulas de trigo. A la izquierda se ve la comparación del peso radicular y a la derecha se ve la comparación del peso de la parte aérea de la planta para cada tratamiento. En la imagen del medio se ve a la izquierda raíces de trigo con aplicación de dosis de 100 ppm a los granos al momento de la siembra y a la derecha, las raíces del tratamiento testigo.

B) **Cebada**

Tal como se observa en la Figura 13 hubo un incremento del peso fresco total de las plántulas al tratar los granos de cebada con ambas dosis de NPs de ZnO respecto al control, en especial el efecto fue más marcado al aplicar la dosis baja. Pero esta diferencia notoria en el peso fresco no fue tan marcada al evaluar los resultados en el peso seco.

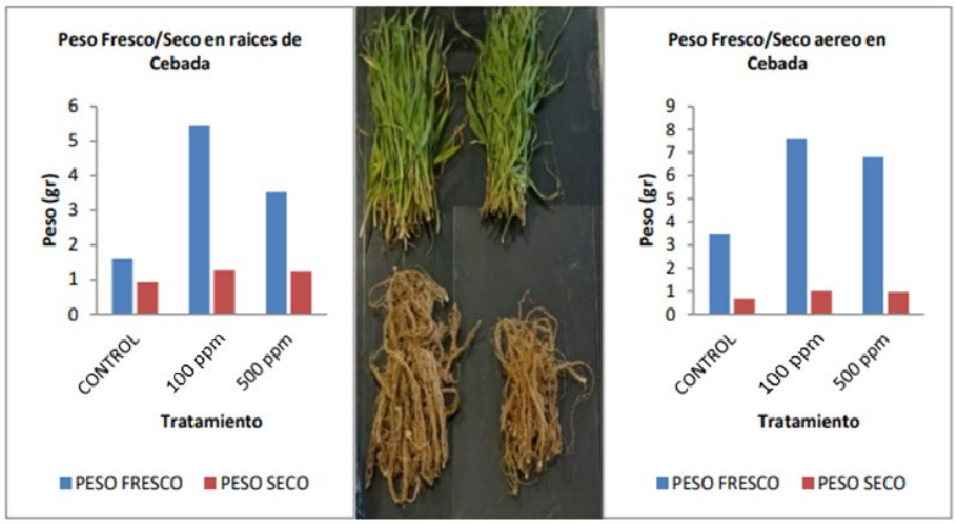


Figura 13: Comparación de Peso fresco/seco en raíces y en la parte aérea en plántulas de cebada. A la izquierda se ve la comparación del peso radicular y a la derecha se ve la comparación del peso de la parte aérea de la planta para cada tratamiento. En la imagen del medio se ve a la izquierda cebada con dosis de aplicación de 100 ppm de NPs y a la derecha el testigo.

6) Vigor

Aplicando la fórmula para cálculo de vigor en plantas propuesta por Abdul-Baki and Anderson (1973), los resultados indicaron incrementos del 31.59 % y del 44,52% aplicando dosis altas de NPs de ZnO en trigo y cebada respectivamente, y del 39,28% y 68,90% cuando las NPs se aplicaron a dosis bajas.

Estos resultados indican incrementos significativos en el vigor de ambos cultivos testeados y en ambas dosis. Es de destacar el efecto de la dosis baja de NPs de ZnO en cebada, cuyo incremento en vigor supero el 50%.

Discusión

El estudio permitió evaluar el impacto que tuvieron las NPs de ZnO en la germinación y desarrollo de trigo y cebada, resultando que la dosis baja de 100 ppm tuvo beneficios significativos comparándola con la dosis alta de 500 ppm y el control, principalmente con los parámetros de altura de las plantas, desarrollo radicular y contenido de clorofila, similar a lo que ocurrió en el trabajo realizado por Munir *et al*., 2018, en trigo, donde también la dosis de 100 ppm fue la que tuvo los mejores resultados principalmente con respecto a la altura de las plantas, peso de las raíces y el contenido de clorofila. Con respecto a la dosis alta, de 500 ppm, también demostró un efecto positivo en trigo y cebada principalmente en la longitud de las raíces y altura de las plantas en comparación con el control, sin embargo, teniendo en cuenta su efecto para todos los parámetros tuvo resultados inferiores a los alcanzados por la dosis de 100 ppm. Determinando que en dosis próximas a las 500 ppm se reduce el efecto estimulante en la germinación que tienen las NPs de ZnO en trigo y cebada, como indica el trabajo realizado por Santas *et al*., 2023, donde se comparan los efectos que tienen las diferentes concentraciones de las NPs de ZnO en diferentes cultivos incluyendo al trigo.

La presente investigación ha demostrado el potencial de las nanopartículas (NPs) de síntesis biológica como una herramienta innovadora y eficiente para la mejora del rendimiento de los cultivos agrícolas. Esta tecnología no solo incrementa la productividad agrícola, sino que también representa una solución sustentable frente a los desafíos ambientales actuales en cuanto a

(a) Innovación en Tecnología Agrícola:

El uso de las NPs de síntesis biológica puede mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes y plaguicidas, reduciendo así la cantidad de insumos necesarios y minimizando el impacto ambiental (González et al., 2023). La técnica del pelleteado facilita su aplicación y adherencia a los granos, permitiendo una distribución uniforme y una absorción eficiente por las plantas (Ramírez y López, 2022). Esta simplicidad también se convierte en una opción muy práctica ya que se puede aplicar con otros productos, ya sea con cura semillas, inoculantes, etc. Esto además lo convierte en una gran ventaja ya que se podría comercializar junto con otros productos, cabe mencionar que en este trabajo no se evaluó el efecto o compatibilidad que tendría aplicarlo con otros insumos, por lo tanto, es importante mencionar que a futuro se puede analizar el comportamiento de este aspecto

mencionado. Esta ventaja de aplicación lo convierte en una opción económica y accesible para los productores.

(b) Reducción de la Huella Ambiental y Mercados de Carbono:

La adopción de las NPs evaluadas, al ser de síntesis biológica no solo disminuyen la huella ambiental en el momento de aplicación en el campo sino también en todo el proceso desde su elaboración, haciendo que toda la cadena tenga bajos impactos ambientales. Al ser de síntesis verde las emisiones de carbono en la elaboración de estas NPs son muy bajas, además al ser de tamaño “nano” se trabaja con dosis muy pequeñas y el transporte y manipulación de estas es mucho más práctico, fácil y eficiente, a comparado de fertilizantes convencionales de síntesis química y que requieren grandes volúmenes para su aplicación. Al disminuir la dependencia de agroquímicos convencionales y optimizar el uso de recursos, se promueve una agricultura más limpia y sostenible. En la actualidad es muy importante tener en cuenta y pensar a largo plazo la forma de producir alimentos y el consumidor de primer mundo cada vez está más interesado en conocer la huella ambiental que tiene el producto que está consumiendo. Argentina es un gran exportador de materias primas y los países importadores cada vez que vez son más exigentes en comprar productos con baja huella ambiental. Además, la mejora en la sustentabilidad de producción y el potencial para reducir emisiones de carbono, a largo plazo capturar el carbono en el suelo abren nuevas oportunidades en los mercados de carbono, proporcionando incentivos económicos adicionales para las empresas que adopten estas práctica y Argentina todavía tiene un potencial y una ventaja muy grande respecto a otros países (Vázquez, 2015).

(c) Consideraciones Futuras y Toxicología

Si bien los resultados son alentadores, es crucial considerar la evaluación toxicológica de las NPs en las plantas y en el ecosistema en general (Sharma *et al.*, 2023). Este estudio no abordó aspectos relacionados con la toxicidad potencial de las NPs, lo cual representa una limitación que debe ser estudiada en futuras investigaciones. Es esencial comprender plenamente los efectos a largo plazo y asegurar que la introducción de NPs no genere impactos adversos.

Conclusión

Los resultados de los experimentos realizados sobre trigo y cebada demuestran que las nanopartículas de Zinc fueron eficientes en promover el crecimiento y desarrollo de las plántulas, su vigor y el contenido de clorofila, pudiendo ser transportadas desde su penetración por semillas. La efectividad varió en función de la dosis de aplicación alta (500 ppm) o baja (100 ppm) y el cultivo ya sea trigo o cebada, se puede concluir que la dosis baja tuvo los mejores resultados a modo general, salvando algunas excepciones, esto se puede deber a que la dosis alta de 500 ppm pudo tener algún efecto ligero de fitotoxicidad que no permite alcanzar resultados tan favorables como en el testigo, comprobando que comparativamente, la dosis baja fue la mejor. Todo esto demuestra el potencial que tienen las NPs de ZnO para incrementar la actividad metabólica celular y translocación de los fotosintatos en forma significativa a juzgar por los

incrementos en los parámetros morfométricos evaluados. La aplicación de bionanopartículas en agro constituye además una herramienta amigable, orientada a lograr máximos rendimientos de los cultivos compatible con la protección del medio ambiente. Este estudio no solo pone de manifiesto la viabilidad del uso de las NPs en la agricultura moderna para la producción de cereales, sino que también abre la puerta a futuras investigaciones que profundicen en su aplicación y efectos en otros cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

Abdul Hafeez, Abdul Razzaq, Tariq Mahmood, Hafiz Muhammad Jhanzab. 2015. Potential of Copper Nanoparticles to Increase Growth and Yield of Wheat. J Nanosci Adv Tech 1(1): 6-11. doi: https://doi.org/10.24218/jnat.2015.02

Altomare, C., W.A. Norvell, T. Bjorkman & G.E. Harman. 1999. Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant growth-promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. Applied and Environmental Microbiology 65: 2926-2933

Bolsa de Cereales PAS. 2023. Informes y datos: dataset histórico.

Consolo, V. F., Torres-Nicolini, A., & Alvarez, V. A. 2020. Mycosinthetized Ag, CuO and ZnO nanoparticles from a promising *Trichoderma harzianum* strain and their antifungal potential against important phytopathogens. *Scientific Reports*, *10*(1), 20499. https://doi.org/10.1038/s41598-020-77294-6

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, Y.C. InfoStat Version 2011; Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina, Volume 8, pp. 195–199.

Gábor Feigl. 2023. The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: a comprehensive review, Journal of Plant Interactions, 18:1, DOI: 10.1080/17429145.2023.2243098

Gallo, MB., Martinez, S., Perelló, AE. Alvarez, VA., Consolo, VF. 2024. Green Synthesis of Copper Oxide Nanoparticles from *Trichoderma harzianum*: A Novel Approach for Managing Wheat Blast Disease.

González, R., Martínez, M., & Sánchez, P. 2023. Biological synthesis of nanoparticles for agricultural use. Agricultural Nanotechnology Journal, 10(1), 45-59.

Méndez, B., Argüello, I., Vera-Reyes, E., Mendoza-Mendoza, L.A., García-Cerda, B.A., Puente-Urbina, R.H. & Lira-Saldívar, A. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de Capsicum annuum por nanopartículas de óxido de zinc. Departamento de Plásticos en la Agricultura, Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila. México.

Munir, T., Rizwan, M., Kashif, M., Shahzda, A., Ali, S., Amin, N., Zahid, R., Alam, M.F.E, Imran, M. 2018. Effect of zinc oxide nanoparticles on the growth and Zn uptake in wheat (Triticum aestivum l.) By seed priming method. Physics department, Government College University, Allama Iqbal Road, 38000 Faisalabad, Pakistan.

Prabha Rai-Kalal, Anjana Jajoo. 2021. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. School of Life Sciences, Devi Ahilya University, Indore, India.

Ramírez, F., & López, A. 2022. Pelletized seed treatment with nanoparticles. Crop Science Review, 9(3), 198-207.

Santas, V., Arias, M., Rodriguez, A., Arenas, D. 2023. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222

Sigaudo, D. & Terré, E. 2021. Importancia de la cadena triguera para la economía argentina. Bolsa de Comercio de Rosario.

Sharma, N., Kurmi, B., Singh, D., Mehan, S., Khanna, K., Karwasra, R., Kumar, S., Chaudhary, A., Jakhmola, V., Sharma, A., Singh, S., Dua, K., Kakkar, D. 2024. Nanoparticles toxicity: an overview of its mechanism and plausible mitigation strategies. DOI: 10.1080/1061186X.2024.2316785

Taran, N., Storozhenko, V. & Svietlova, N. 2017. Effect of Zinc and Copper Nanoparticles on Drought Resistance of Wheat Seedlings. https://doi.org/10.1186/s11671-017-1839-9

Vázquez. 2015. Nanotecnología en procesos ambientales y remediación de la contaminación. Universidad Nacional Autónoma de México. DOI:10.22201/ceiich.24485691e.2015.14.52514.

Wei Du, Jingya Yang, Qingqing Peng, Xiaoping Liang, Hui Mao. 2019. Comparison study of zinc nanoparticles and zinc sulphate on wheat growth: From toxicity and zinc biofortification. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, 712100, Shaanxi, China.

Zunun, CA. 2023. Evaluación de fertilizantes nitrogenados, nanopartículas de Zn y bioestimulantes en el cultivo de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench). Universidad Autónoma de Nuevo León facultad de agronomía.

ANEXOS

Anexo 1

Longitud de plántulas de cebada

ANOVA

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Longitud de plántula	51	0,52	0,50	23,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1544,77	2	772,39	26,22	<0,0001
Tratamiento	1544,77	2	772,39	26,22	<0,0001
Error	1414,15	48	29,46		
Total	2958,92	50			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,74326

Error: 29,4614 gl: 48

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Cebada control	17,12	17	1,32	A	
Cebada alta	22,94	17	1,32	B	
Cebada baja	30,56	17	1,32		C

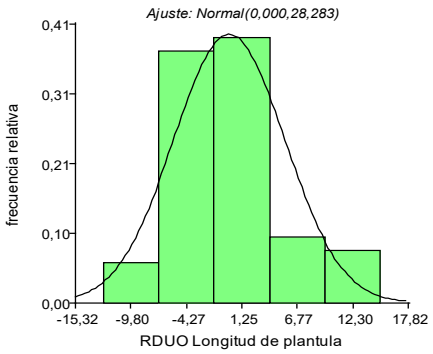
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

ANALISIS DE SUPUESTOS

Normalidad:

H0: Los residuos siguen una distribución Normal.

Ha: Los residuos no siguen una distribución Normal.

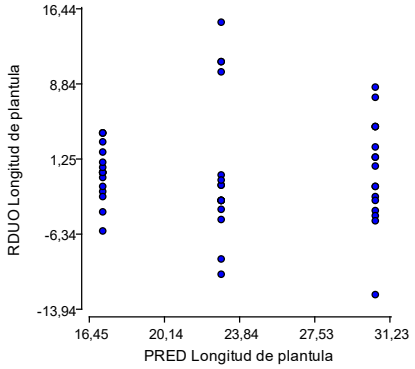


El análisis del histograma, permite observar la distribución normal de los errores por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Los residuos tienen distribución NORMAL.

HOMOCEDASTICIDAD:

H0: Los residuos son homocedásticos

Ha: Los residuos son heterocedásticos



El diagrama de dispersión no muestra ningún patrón en la distribución de los residuos por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Las varianzas son HOMOGENEAS.

Anexo 2

Longitud de plántulas de trigo

ANOVA

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Longitud de plántula	51	0,25	0,22	30,05

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	903,72	2	451,86	7,87	0,0011
Tratamiento	903,72	2	451,86	7,87	0,0011
Error	2756,41	48	57,43		
Total	3660,13	50			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=5,22607

Error: 57,4252 gl: 48

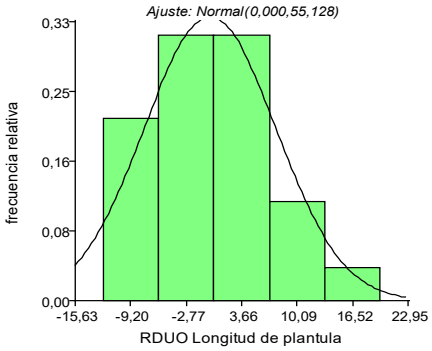
Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Trigo control	19,41	17	1,84	A	
Trigo alta	26,97	17	1,84		B
Trigo baja	29,26	17	1,84		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Normalidad:

H0: Los residuos siguen una distribución Normal.

Ha: Los residuos no siguen una distribución Normal.



El análisis del histograma, permite observar la distribución normal de los errores por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Los residuos tienen distribución NORMAL

HOMOCEDASTICIDAD:

H0: Los residuos son homocedásticos

Ha: Los residuos son heterocedásticos

TEST DE LEVENE:

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
RABS Longitud de plántula	51	1,1E-03		0,00	84,04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,27	2	0,63	0,03	0,9728
Tratamiento	1,27	2	0,63	0,03	0,9728
Error	1100,10	48	22,92		
Total	1101,37	50			

Puesto que el valor-p computado por el test de Levene es mayor que el nivel de significación alfa=0,05, no se rechaza la hipótesis nula H0. Las varianzas son HOMOGENEAS.

Anexo 3

Longitud radicular de cebada

ANOVA

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Long radicular	51	0,07	0,03	17,95

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	38,91	2	19,46	1,75	0,1851
Tratamiento	38,91	2	19,46	1,75	0,1851
Error	534,44	48	11,13		
Total	573,35	50			

Debido a que el análisis de la varianza arroja p>0.05, se concluye que no hay diferencias significativas entre tratamientos.

Anexo 4

Longitud de radicular de trigo

ANOVA

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Long radicular	51	0,10	0,06	26,99

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	160,89	2	80,45	2,71	0,0767
Tratamiento	160,89	2	80,45	2,71	0,0767
Error	1425,09	48	29,69		
Total	1585,98	50			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,75772

Error: 29,6893 gl: 48

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Trigo control	17,68	17	1,32	A	
Trigo alta	21,35	17	1,32	A	B
Trigo baja	21,53	17	1,32		B

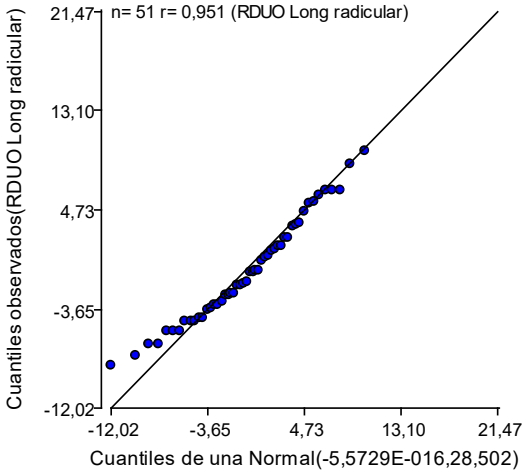
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

ANALISIS DE SUPUESTOS

Normalidad:

H0: Los residuos siguen una distribución Normal.

Ha: Los residuos no siguen una distribución Normal.



El análisis del qq-plot, permite observar la distribución normal de los errores por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Los residuos tienen distribución NORMAL

HOMOCEDASTICIDAD:

H0: Los residuos son homocedásticos

Ha: Los residuos son heterocedásticos

TEST DE LEVENE

Análisis de la varianza

Variable	N	R²	R² Aj	CV
RABS Long radicular	51	0,01	0,00	85,96

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7,15	2	3,57	0,29	0,7459
Tratamiento	7,15	2	3,57	0,29	0,7459
Error	581,58	48	12,12		
Total	588,73	50			

Puesto que el valor-p computado por el test de Levene es mayor que el nivel de significación alfa=0,05, no se rechaza la hipótesis nula H0. Las varianzas son HOMOGENEAS.

Anexo 5

CONTENIDO DE CLOROFILA

CEBADA:

ANOVA

Variable	N	R²	R² Aj	CV

Cont. Clorofila umoles/m2	93	0,11	0,09	31,77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	181,19	2	90,60	5,80	0,0043
Tratamiento	181,19	2	90,60	5,80	0,0043
Error	1406,95	90	15,63		
Total	1588,14	92			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1,99516

Error: 15,6328 gl: 90

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Cebada alta	11,01	31	0,71	A	
Cebada testigo	12,00	31	0,71	A	
Cebada baja	14,34	31	0,71		B

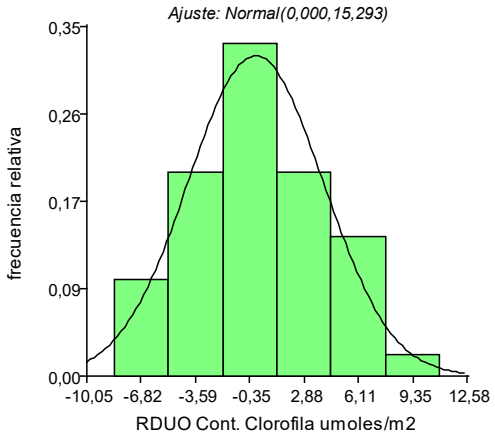
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

ANALISIS DE SUPUESTOS

Normalidad:

H0: Los residuos siguen una distribución Normal.

Ha: Los residuos no siguen una distribución Normal.

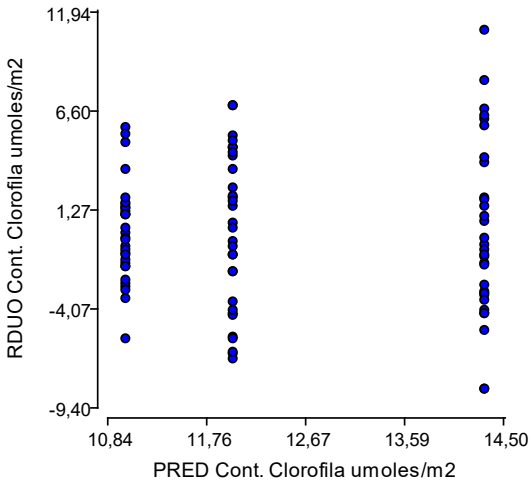


El análisis del histograma, permite observar la distribución normal de los errores por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Los residuos tienen distribución NORMAL

HOMOCEDASTICIDAD:

H0: Los residuos son homocedásticos

Ha: Los residuos son heterocedásticos



El diagrama de dispersión no muestra ningún patrón en la distribución de los residuos por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Las varianzas son HOMOGENEAS.

Anexo 6

CONTENIDO DE CLOROFILA

TRIGO:

ANOVA

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
Cont. Clorofila umoles/m2	93	0,53	0,51	32,11	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1221,81	2	610,91	49,81	<0,0001
Tratamiento	1221,81	2	610,91	49,81	<0,0001
Error	1103,72	90	12,26		
Total	2325,53	92			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1,76713

Error: 12,2635 gl: 90

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
Trigo testigo	6,17	31	0,63	A	
Trigo alta	11,57	31	0,63		B
Trigo baja	14,97	31	0,63		C

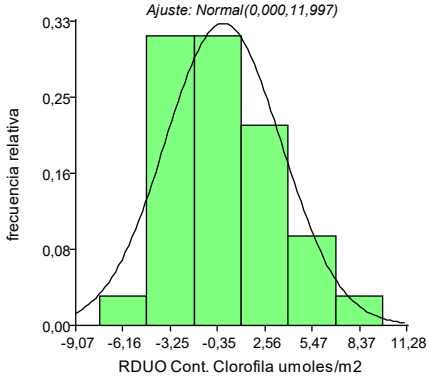
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

ANALISIS DE SUPUESTOS

Normalidad:

H0: Los residuos siguen una distribución Normal.

Ha: Los residuos no siguen una distribución Normal.

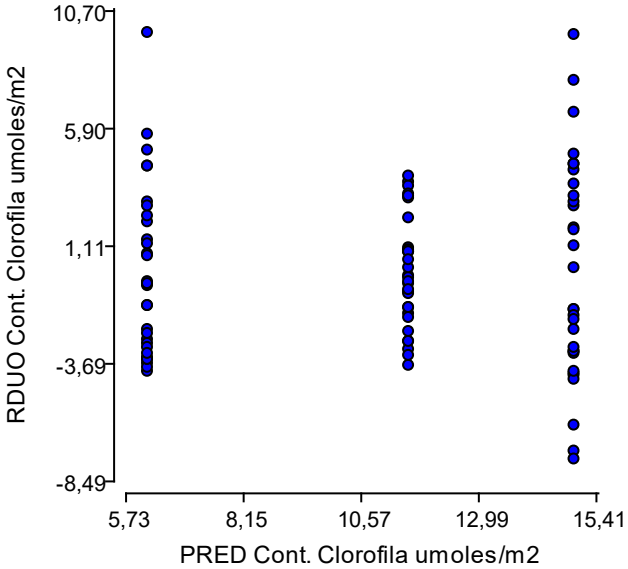


El análisis del histograma, permite observar la distribución normal de los errores por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Los residuos tienen distribución NORMAL

HOMOCEDASTICIDAD:

H0: Los residuos son homocedásticos

Ha: Los residuos son heterocedásticos



El diagrama de dispersión no muestra ningún patrón en la distribución de los residuos por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula H0. Las varianzas son HOMOGENEAS.