



**Evaluación del potencial estimulante de bionanopartículas de óxido de cobre (NPs CuO)
en soja y poroto: avances innovadores en nanotecnología agrícola**

ALUMNO:

Juan Matías Saravia- estudiante de Ingeniería Agronómica- Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA)- Facultad de Ingeniería y Cs Agrarias, CABA.

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.

ÍNDICE

Resumen	pág. 4
Introducción	pág. 5
Materiales y Métodos	pág. 10
Resultados	pág. 12
Discusión	pág. 20
Conclusión	pág. 24
Bibliografía	pág. 26
Anexos	pág. 30

FIGURAS

Figura 1: % de germinación en poroto	pág. 12
Figura 2: T50 de germinación en poroto	pág. 12
Figura 3: % de germinación en soja.....	pág. 13
Figura 4: T50 de germinación en soja	pág. 13
Figura 5: Longitud radicular en poroto a 30 dds	pág. 14
Figura 6: Volumen radicular poroto (vista)	pág. 14
Figura 7: Longitud radicular en soja a 30 dds	pág. 14
Figura 8: Biomasa aérea en soja (vista)	pág. 15
Figura 9: Altura de planta en poroto	pág. 16
Figura 10: Número de hojas en poroto	pág. 16
Figura 11: Altura de planta en soja	pág. 17
Figura 12: Número de hojas en soja	pág. 17

Figura 13: Longitud radicular en soja a 30 dds	pág. 17
Figura 14: Contenido de clorofila en poroto (SPAD)	pág. 18
Figura 15: Medicion con (SPAD)	pág. 18
Figura 16: Contenido de clorofila en soja (SPAD)	pág. 18
Figura 17 A y B: Plantas en estufa – peso seco	pág. 19
Figura 18: Peso fresco/seco raices poroto	pág. 19
Figura 19: Peso fresco/seco parte aérea poroto	pág. 19
Figura 20: Peso fresco/seco en raices soja	pág. 20
Figura 21: Peso fresco/seco aéreo en soja	pág. 19
Figura 22: diferentes aplicaciones potenciales de la NT	pág. 21

ANEXOS

Anexo 1: Longitud radicular en poroto	pág. 30
Anexo 2: Longitud radicular en soja	pág. 30
Anexo 3: Altura y número de hojas – Poroto	pág. 31
Anexo 4: Altura y número de hojas – Soja	pág. 33
Anexo 5: Contenido de clorofila – Poroto	pág. 34
Anexo 6: Contenido de clorofila – Soja	pág. 35

RESUMEN

En este trabajo se realizó un bioensayo bajo condiciones controladas de laboratorio con el objeto de evaluar la efectividad biológica de bionanopartículas (NPs) de cobre (NPsCuO) aplicadas por la técnica de peleteado en granos de oleaginosas-soja y poroto-, y su impacto en parámetros de crecimiento y desarrollo de las plántulas en etapas tempranas de su desarrollo vegetativo. Los tratamientos a considerar fueron los siguientes, controles, soja (S), poroto (P), poroto con NPsCuO dosis baja (50 ppm), poroto con NPsCuO dosis alta (300 ppm), soja con NPsCuO dosis baja (50 ppm) y soja con NPsCuO dosis alta (300 ppm). Las NPs a ambas dosis se evaluaron en dos tipos de ensayos, un bioensayo siguiendo el protocolo de las normas ISTA (International Seed Test Association) y un ensayo en macetas. Las variables registradas fueron el % de germinación, velocidad de germinación, altura de la parte aérea de las plántulas, longitud de la raíz principal, número de hojas desarrolladas y peso seco de las plántulas. Se considero además el índice de verdor (clorofila) y se calculó el vigor. Las variables fueron analizadas estadísticamente en la etapa comprendida entre el momento de germinación y los 30 días posteriores a la siembra de las plantas (dds) para evaluar el impacto de las NPsCuO en la etapa fisiológica vegetativa de las mismas. Se evidenció un incremento significativo en la velocidad germinativa, altura de las plantas, longitud radicular, vigor y actividad fisiológica medida por aumento en el contenido de clorofila, tamaño de hojas y peso de las plantas en los tratamientos que recibieron las NPs respecto a los controles sin tratar, dependiendo del cultivo y la dosis aplicada. Resultados de los experimentos aquí realizados demuestran que las bionanopartículas son transportadas desde su penetración por semillas, pudiendo incrementar la actividad metabólica celular y translocación de los fotosintatos en forma significativa, logrando promover el crecimiento de los cultivos de una manera efectiva. 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. Estos resultados indican el potencial de las NPsCuO para mejorar de manera sustentable el rendimiento y la productividad de estos cultivos agrícolas bajo condiciones de campo.

Palabras Clave: Agronanotecnología; NPsCuO; nanofertilizantes; agricultura sustentable

INTRODUCCIÓN

El cultivo de soja (*Glycine max*) es indudablemente uno de los pilares fundamentales de la agricultura argentina y juega un papel crucial en la economía del país. Argentina se destaca como uno de los principales productores y exportadores mundiales de este cultivo, consolidándose como líder en el mercado internacional de granos. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2023).

Desde su introducción en la década de 1950, la soja ha experimentado un crecimiento exponencial en su producción y superficie cultivada en Argentina. Este aumento se debe en gran medida a su adaptabilidad a una variedad de condiciones climáticas y su alta rentabilidad económica. La soja se ha convertido en un cultivo clave en la rotación de cultivos de muchas regiones agrícolas del país, contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas de producción (Mercuri et al., 2015).

La importancia de la soja trasciende los límites agrícolas y económicos, extendiéndose a aspectos sociales y ambientales. En términos de empleo, la cadena de valor de la soja genera numerosos puestos de trabajo directos e indirectos, brindando oportunidades de empleo en áreas rurales y urbanas. (AgroSpray blog, 2021).

Además, la soja desempeña un papel crucial en la seguridad alimentaria y en la provisión de materias primas para la industria agroalimentaria y de biocombustibles. Su amplio uso en la alimentación animal y humana, así como en la fabricación de productos industriales, la posiciona como un cultivo estratégico para el desarrollo económico del país (INTA, 2021).

Sin embargo, el cultivo de soja no está exento de desafíos y controversias. Las prácticas agrícolas intensivas, como el uso excesivo de agroquímicos y la deforestación, han generado preocupaciones ambientales y sociales. La búsqueda de prácticas agrícolas más sustentables y la promoción de una agricultura responsable es fundamental para garantizar la viabilidad a largo plazo de la producción de soja en Argentina (Ministerio de Agricultura, 2021).

Por otro lado, el poroto (*Phaseolus vulgaris*) se considera otra leguminosa de importancia económica, típicamente de una economía regional en la región agroecológica del NOA (Salta, Jujuy, Tucumán, Santiago del Estero) siendo Salta la provincia que reúne más del 70% de la producción (INTA, 2020). La diversidad climática y geográfica de la región proporciona un ambiente propicio para el cultivo de esta leguminosa, que se adapta a una amplia gama de condiciones ambientales.

El consumo de poroto en Argentina es bastante bajo comparado con otros países, en promedio, en-nuestro país, es de 200 o 240 gramos por año por persona, mientras que en Brasil es de 24 kilos por persona por año y en México 18 kilos (INTA Salta, 2018). No obstante, el bajo consumo per cápita en Argentina, el grano de este cultivo tiene un alto potencial exportador, lo que lo convierte en un componente clave de la economía provincial y en un motor de desarrollo para las comunidades rurales.

Al igual que la soja, al ser un cultivo atractivo y rentable, enfrenta desafíos diversos, que van desde la disponibilidad de recursos hídricos hasta la presión de plagas y enfermedades. Hace décadas atrás cuando el poroto se empezó a cultivar en la zona de Salta, los productores se entusiasmaron debido a su rentabilidad y se adoptó bajo la forma de monocultivo sin hacer enfoque a rotaciones sustentables. Esto trajo como consecuencias la aparición de enfermedades y la erosión de los suelos perdiendo gran parte de la materia orgánica, por lo tanto, su producción actual requiere de un enfoque más agroecológico y sustentable.

Entre las prácticas innovadoras aplicadas al agro, la aplicación de nanotecnología en la producción de cultivos ha despertado un creciente interés en los últimos años, gracias a su potencial para abordar desafíos cruciales en la producción de alimentos y mejorar la eficiencia de los cultivos. Este enfoque innovador también presenta la atractiva posibilidad de reducir el uso de agroquímicos convencionales, o complementar su uso, lo que convierte a la agricultura en más sustentable. Otro de los beneficios aportados por el uso de nanopartículas en lugar de productos convencionales es que facilita el transporte y la manipulación ya que los volúmenes en que se

utilizan son muy pequeños comparándolo con los volúmenes de agroquímicos que se usan habitualmente (Saldivar y Méndez Argüello, 2018).

La aparición de nuevos nanodispositivos y nanomateriales dan así la oportunidad a aplicaciones potenciales y líneas de investigación. Las NPs son materiales lo suficientemente pequeños como dentro del rango de 1 a 100 nm). Estos materiales pueden ser usados para liberar pesticidas o fertilizantes en un momento y sitio específico, logrando de esta manera aplicar suspensiones en aéreas muy localizadas, que podrán disminuir el daño a otros tejidos de la planta y a la vez en cantidades pequeñas, reduciendo así el efecto adverso al medio ambiente (Srilatha, 2011). Al tener un tamaño pequeño estas partículas adquieren propiedades físicas y químicas particulares, siendo más reactivas debido a su gran superficie de contacto (Bhushan, 2017).

En este contexto, las nanopartículas utilizadas en el agro han aparecido como materiales muy interesantes debido a su capacidad para mejorar el crecimiento y la productividad de diversos cultivos, entre otros beneficios. Khot et al. (2012) indican que Nps de Cu y Zn tienen efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético (AIA), el cual promueve la elongación y división celular, incrementando así la velocidad de crecimiento en las plantas (Zhao et al., 2014). Asimismo, no solo promueven el crecimiento y desarrollo de las plantas, sino que además brindan protección frente a ciertas enfermedades fúngicas (Perelló et al. 2025).

Es sabido que el cobre es absorbido por las plantas como ion divalente en suelos aireados y como ion monovalente en suelos húmedos con bajas concentraciones de oxígeno. La absorción de iones comienza en la epidermis de la raíz y el movimiento de la epidermis a la endodermis es por difusión apoplástica y la translocación de cobre de la raíz a las hojas, a través de la xilema, esto se lleva a cabo de forma pasiva por la corriente de la transpiración. El transporte de cobre a través de la membrana plasmática es por medio de canales o transportadores que es la única vía para pasar a través de la endodermis y llegar al tejido, presenta baja movilidad en el floema, siendo considerado un elemento parcialmente móvil, exigiendo aportes significativos vía xilema, o aplicaciones vía foliar, en momentos oportunos de la vida de la planta. (León y Sepúlveda, 2012).

Este elemento, inmóvil en la planta, se destaca por los efectos benéficos que genera. Su contenido promedio dentro de las plantas puede variar entre 1 a 25 ppm. Participa como coenzima en sistemas enzimáticos cruciales involucrados en la formación de aminoácidos, la desintoxicación de radicales superóxidos y la síntesis de clorofila en los cloroplastos. El cobre también es necesario para la síntesis de proteínas y enzimas que influyen en el color y sabor de los frutos (Marschner et al., 2012). Además, el cobre juega un papel crítico en la formación de la pared celular, especialmente en la síntesis de lignina, que brinda soporte y rigidez a las plantas. También participa en el transporte de electrones y en reacciones de óxido-reducción, lo que es esencial para el metabolismo energético. En términos de reproducción, es necesario para la formación de polen viable, lo que afecta la polinización y fertilización. También contribuye a la formación de semillas y ayuda a las plantas a resistir el estrés causado por condiciones ambientales adversas, como sequías, altas temperaturas o salinidad (Alloway, 2008).

Además de las importantes funciones nutricionales que posee el cobre en las plantas, este elemento cumple un rol fundamental en la prevención de enfermedades con propiedades fungicidas y bactericidas, ayudando a mantener una correcta sanidad de los cultivos, ya que les confieren una protección frente a patógenos y condiciones medioambientales adversas. Actúa inhibiendo el crecimiento y la reproducción de los hongos al dañar sus estructuras celulares y afectar su metabolismo. Se considera un fungicida de amplio espectro, lo que significa que puede ser eficaz contra una amplia variedad de enfermedades fúngicas. Presenta acción protectora multisitio, ya que actúa sobre 6 diferentes estructuras y/o procesos de la célula del hongo (núcleo, ribosoma, mitocondria, retículo endoplásmico liso y rugoso, membrana plasmática y cromatina (Senasa, 2021). Esta propiedad se pudo ver claramente en un ensayo realizados en plantas de tomates contra *Fusarium*, concluyendo que la aplicación de NPsCuO ayudaban a controlar dicho patógeno, además de actuar como promotor de crecimiento de las plantas de tomate (Lopez-Lima aet al., 2021). Otros estudios donde se aplicaron NPsCuO en plantas de tomate, indican que dosis de 25- 50 ppm, indujeron una mayor altura de las plantas, con mayor diámetro de tallo, números

de hojas, área foliar, mayor vigor, incremento radicular y mejora en la germinación (Arredondo et al., 2020).

Estos antecedentes, subrayan el potencial de las nano partículas y la necesidad de investigar más a fondo este campo, explorando diferentes cultivos y su aplicación en distintas etapas fenológicas de las plantas. Cabe destacar que las NPs pueden sintetizarse a partir de métodos físicos y químicos, pero también hay otras alternativas que son de origen biológico partiendo de plantas o microorganismos. Una de ellas es la síntesis a partir del filtrado del hongo *Trichoderma harzianum* (Singh et al., 2018; Consolo et al., 2020).

Por lo expuesto, este proyecto se centra en el estudio del efecto de bionanopartículas de cobre como promotoras del crecimiento en los cultivos de poroto y soja en variables como porcentaje de germinación, desarrollo de plántula, acumulación de biomasa y contenido de clorofila.

Esta contribución está alineada con iniciativas que propicien una producción agrícola más sustentable disminuyendo el uso de agroquímicos sintéticos convencionales, probando e innovando productos novedosos y amigables con el medioambiente. En términos generales, ayuda para facilitar el área técnica y científica en garantizar información nueva con experimentos que brindan resultados auténticos de laboratorio para futuros procesos de producción.

Objetivo general

Determinar la respuesta fisiológica a la aplicación de NPsCuO, en el proceso germinativo y en el desarrollo de plántulas de soja y poroto. Conocer el efecto que tiene la aplicación de diferentes concentraciones NPsCuO.

Hipótesis

Al menos uno de los tratamientos de imbibición de semillas con NPSCuO promueve la germinación, el vigor y el desarrollo de plántulas, incrementa la biomasa y el contenido de clorofila en plántulas de soja y/o poroto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos experimentales fueron realizados en el Laboratorio de Producción Vegetal de la Facultad de Ingeniería y Cs Agrarias de la UCA. Las NPsCuO fueron propiciadas por el INBIOTEC de Mar del Plata, obtenidas por micosíntesis a partir del filtrado del hongo *Trichoderma harzianum* con la técnica descrita (Consolo et al. 2020).

Se utilizaron variedades comerciales de uso actual, para Soja la variedad 46E21 (Don Mario) y para Poroto tipo comercial, la variedad “Escarlata INTA” DRK (Dark Red Kidney) de difusión en Salta.

Las NPsCuO se aplicaron con la técnica de peleteado (recubrimiento) de granos que consistió en mezclar previamente Agar Agua diluido 10%+ concentración indicada-baja o alta- de NPs en suspensión acuosa y luego generar una cubierta en los granos a ensayar. Una vez oreados a temperatura ambiente y condiciones de Laboratorio, se procedió a su siembra de acuerdo con 2 tipos de ensayos planteados bajo condiciones controladas, ambos en las instalaciones del Lab de Producción Vegetal de la UCA.

Las dosis empleadas fueron dos, baja (50 ppm) y alta (300 ppm), cuyas concentraciones se ajustaron en ensayos previos y de acuerdo con antecedentes bibliográficos consultados.

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

Se realizaron bioensayos exploratorios para ajustes de la técnica y dosis a emplear de las NPs, siguiendo las indicaciones de la Asociación Internacional para el test de Semillas (ISTA). La técnica consistió en disponer los granos 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. Se evaluó el efecto de las NPsCuO en la germinación en las semillas y el vigor de las plántulas.

2. Ensayos en macetas

Se realizaron ensayos en macetas plásticas de 1 kg de capacidad disponiendo 2 semillas x maceta y 10 macetas x repetición (tratamiento). Las macetas contenían una mezcla de tierra, arena y perlita/vermiculita. Se mantuvieron bajo condiciones de Laboratorio.

Los tratamientos a considerar fueron los siguientes: controles, soja (S), poroto (P), poroto con NPsCuO dosis baja (50 ppm), poroto con NPsCuO dosis alta (300 ppm), soja con NPsCuO dosis baja (50 ppm) y soja con NPsCuO dosis alta (300 ppm).

Parámetros e indicadores evaluados: Las variables medidas fueron las siguientes: % de germinación, velocidad de germinación, altura de la parte aérea, longitud de la raíz principal, número de hojas desarrolladas y peso seco de plántulas. Se considero además el índice de verdor (clorofila) y se calculó el vigor con la siguiente fórmula:

El índice de vigor se calculó utilizando la siguiente fórmula (Abdul-Baki and Anderson,1973):

$$IV = LR + LB \times PG$$

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

Las variables fueron analizadas entre el momento de germinación y 30 días después de sembradas las plantas (dds) para evaluar el impacto de las NPsCuO en la etapa fisiológica vegetativa de las mismas.

Análisis de datos

Análisis de varianza. Para contrastar la hipótesis de igualdad de medias poblacionales entre los distintos tratamientos, para cada variable se realizó 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.

RESULTADOS

1.1. Efecto de NPsCuO en la germinación de semillas

1.1.1. Poroto

En poroto, no hubo diferencias significativas en el % de germinación entre el control y las semillas tratadas con ambas dosis de NPsCuO. Incluso, el control germinó con más velocidad que los granos tratados con NPs, hasta 5 dds en que se igualó el % de germinación. Tampoco hubo para este cultivo ventajas significativas en las semillas tratadas respecto al control para los días transcurridos hasta alcanzar el T50 (50 % de semillas germinadas en cada tratamiento). Por el contrario, la aplicación de las NPsCuO pareció demorar la germinación de los granos y el tiempo transcurrido hasta alcanzar el T50 (Figuras 1 y 2)

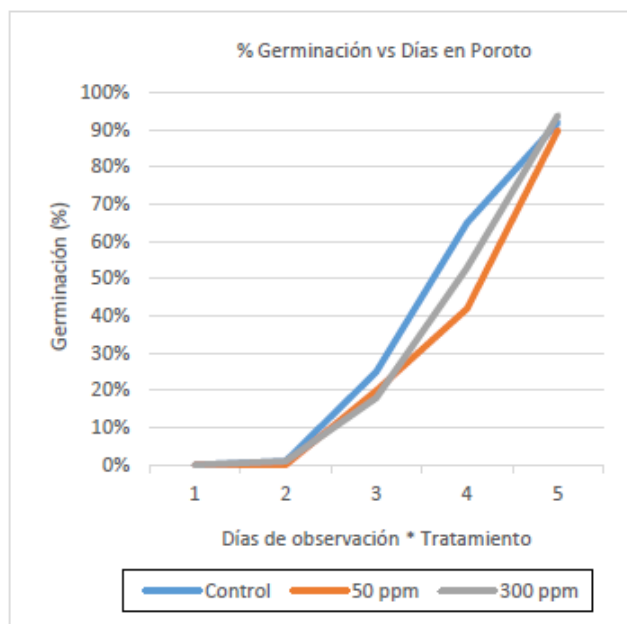


Figura 1

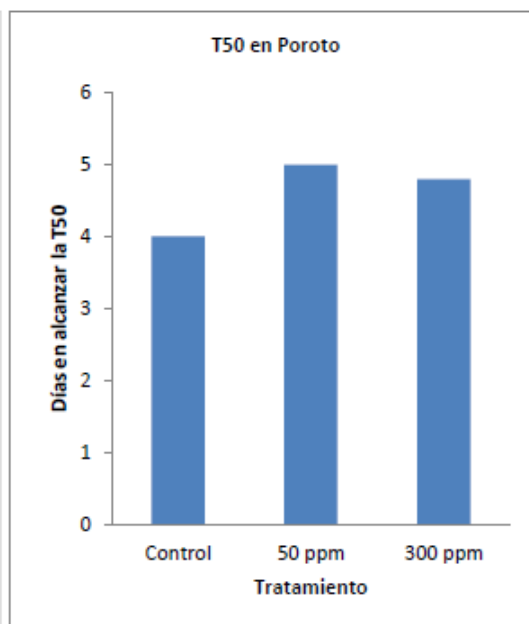


Figura 2

1.1.2. Soja

A diferencia de lo observado en poroto, en soja, tal como se observa en las Figuras 3 y 4, ya al segundo día se observó una germinación del 20% en el lote de semillas tratadas con ambas dosis de NPs CuO respecto al control sin tratar, con una brecha a favor de las semillas tratadas hasta el cuarto día de observación en que se igualaron los valores con el control. El T50 también indica mayor velocidad en alcanzar el 50 % de germinación en las tratadas con ambas dosis respecto al control (Figuras 3 y 4).

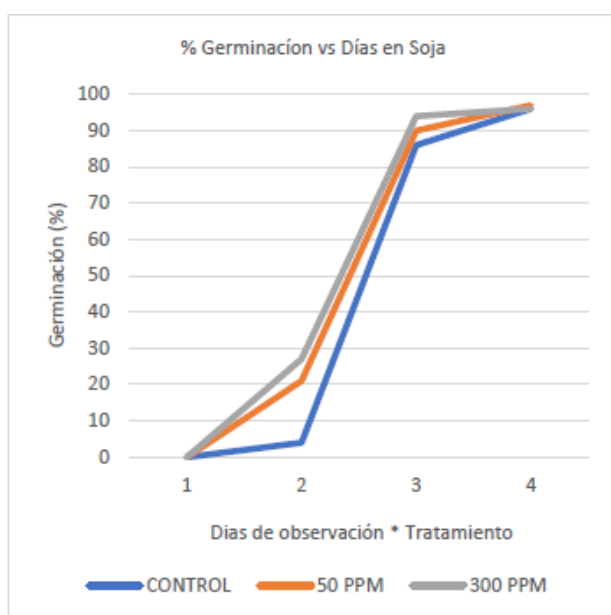


Figura 3

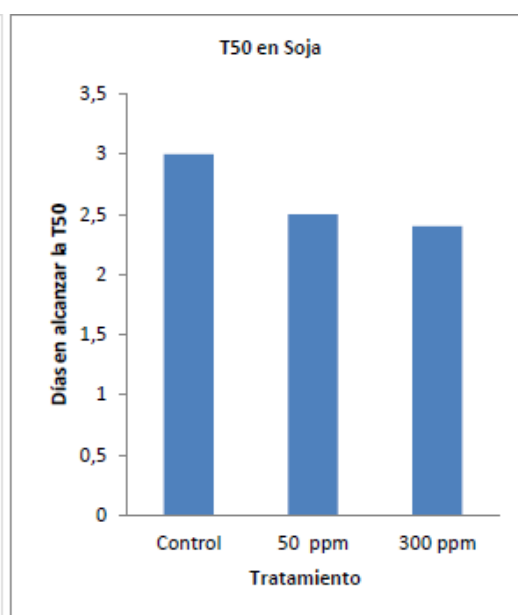


Figura 4

2. Efecto de NPs en la longitud y el número de raíces

2.2. Poroto

A los 30 dds, se observó que, si bien ambas dosis del tratamiento con NPs CuO en grano fueron significativamente más efectivas en estimular la longitud radicular respecto a los controles sin tratar, se destaca especialmente la aplicación de 300 ppm respecto a la aplicación de la dosis de 50 ppm (Figura 5). En la Figura 6 se observan las plantas enteras a los 30 días de desarrollo vegetativo (dds). Se aprecia la mayor cabellera radicular en volumen y longitud.

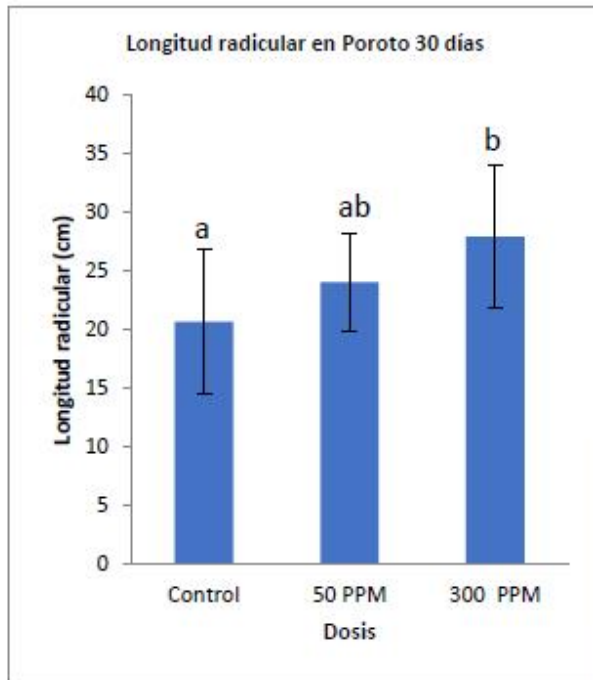


Figura 5



Figura 6

2.3 Soja

Los resultados indican que la longitud radicular de las plantas de soja a los 30 dds se vio incrementada por la aplicación de las NPsCuO respecto al control, en particular la dosis baja demostró ser más efectiva respecto al control y la dosis alta. (Figuras 7 y 8). En la Figura 8 se observa además una mayor biomasa aérea.

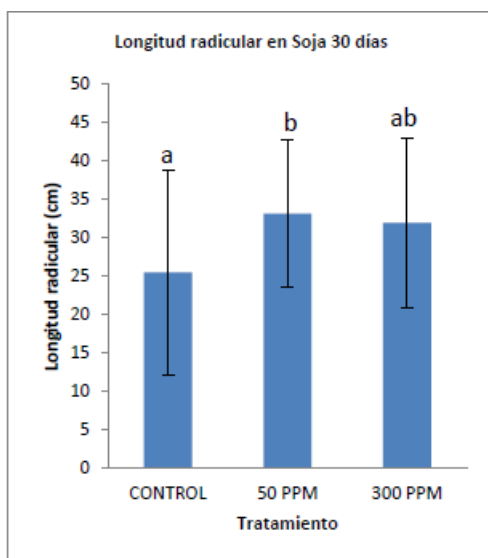


Figura 7



Figura 8

3.Efecto de las NPsCuO en la altura de las plantas y número de hojas.

3.1 Poroto

La altura de las plantas a los 30 dds si bien fue levemente superior en las tratadas con las NPsOCu a dosis de 300ppm, las diferencias no alcanzaron a ser significativas respecto a los controles.

(Figura 9)

Interesantemente, el número de hojas de las plantas se vio incrementado significativamente con la aplicación de la dosis de 300 ppm de NPsCu. (Figura 10).

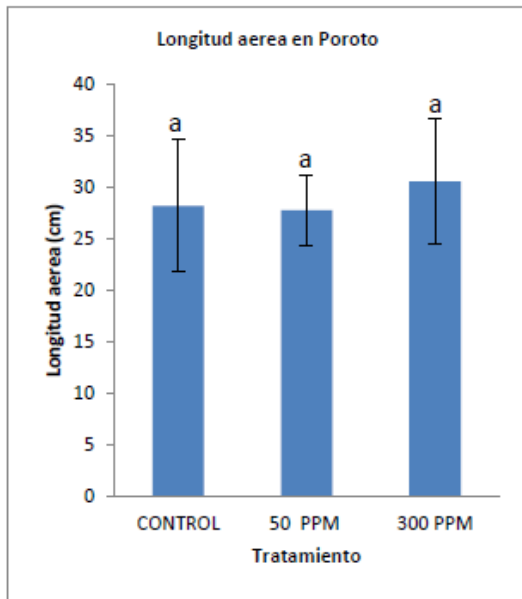


Figura 9

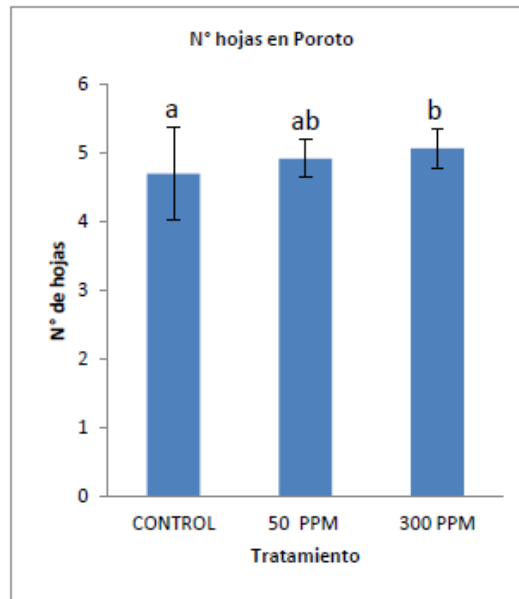


Figura 10

3.2 Soja

En soja, la altura de las plantas evaluada hasta los 30 días de crecimiento vegetativo en macetas, indicó que fue mayor en las plantas tratadas con ambas dosis de NPs con respecto al control. En este caso, las semillas tratadas con dosis baja expresaron aún los mejores resultados (Figura 11). También se observó un mayor desarrollo de números de hojas, observándose en promedio 1 hoja visible más completamente desarrollada con respecto al control (Figura 12). El efecto beneficioso de las NPs_{Cu} aplicadas a los granos de soja en la siembra, también se reflejó en la longitud de las raíces que desarrollaron las plantas a los 30 dds de su desarrollo vegetativo. (Figura 13). Visualmente se apreciaron además más robustas indicando una mayor superficie de exploración radicular en el suelo para captación de nutrientes.

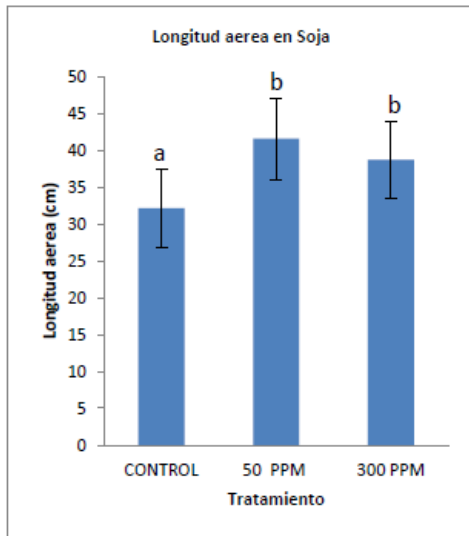


Figura 11

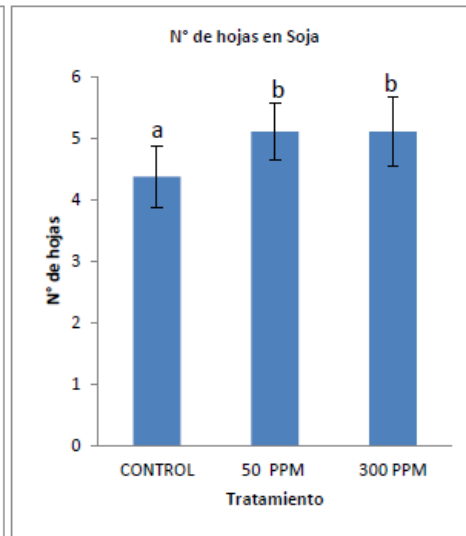


Figura 12



Figura 13

4. Contenido de clorofila

4.1 Poroto

La medición de unidades de clorofila efectuada con el SPAD, indica mayores valores en las plantas tratadas con NPsCuO a ambas dosis, con respecto al control. (Figura 14 y 15).

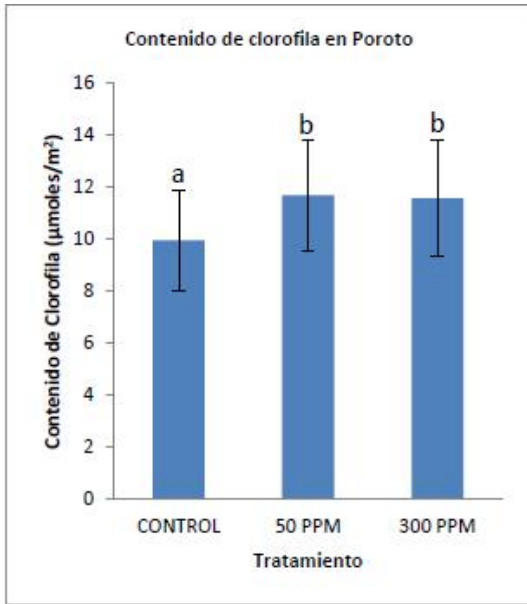


Figura 14



Figura 15

4.2. Soja

Así mismo en soja, la medición de unidades de clorofila efectuada con el SPAD indica mayores valores en las plantas tratadas con ambas dosis de NPsCuO respecto al control (Figura 16). Interesantemente, se observó también una mayor área de superficie de las hojas desarrolladas a los 30 dds comparando las plantas tratadas con ambas dosis de NPsCuO respecto al control.

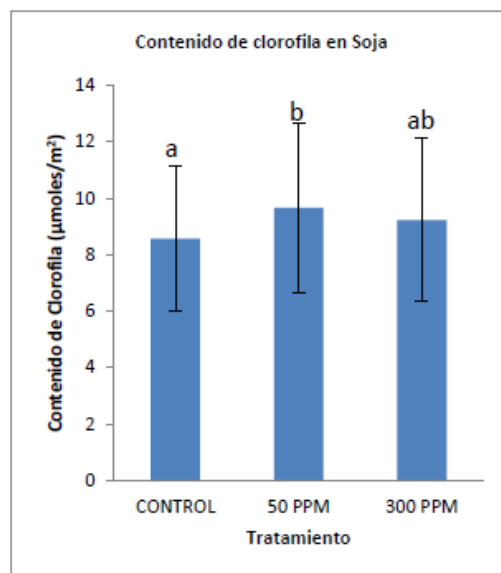


Figura 16

5. Peso fresco y peso seco de las plantas

5.1 Poroto

Una vez descalzadas las plantas de las macetas, se procedió a calcular su peso fresco y seco en estufa de cultivo acondicionando las mismas en bandejas de aluminio hasta peso constante, como se observa en la Figura 17A y B. Tal como se observa en la Figura 18, hubo diferencias significativas de peso fresco en cabellera radicular en las plantas tratadas con NPsCuO, resultando la dosis alta, la más efectiva. El efecto beneficioso de las NPs no se vio reflejado en el incremento del peso de la parte aérea de las plantas ya que no hubo diferencias significativas respecto a los testigos. (Figura 19)



Figura 17 A y B. Tratamiento de las plantas sometidas a estufa para cálculo del peso seco

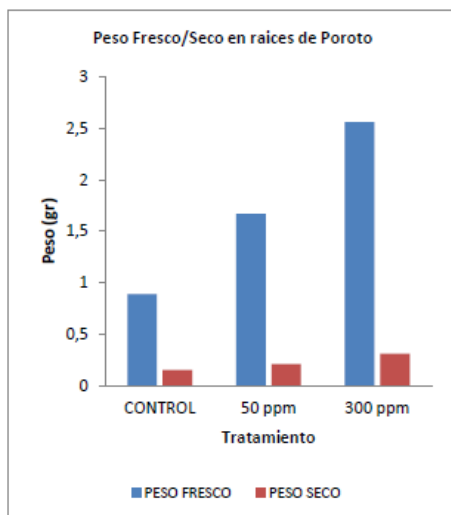


Figura 18

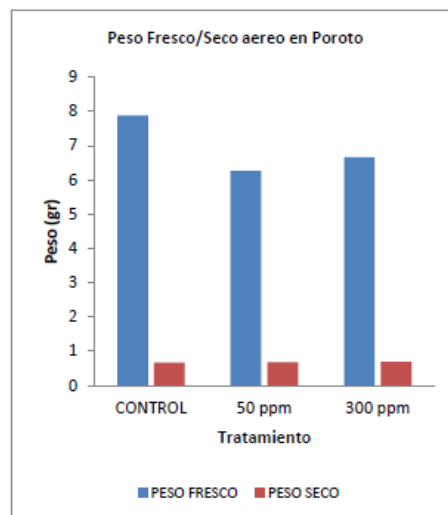


Figura 19

5.2 Soja

El análisis del peso fresco y seco de las plantas de soja discriminado en parte aérea (tallo y hojas) y raíz, refleja el mayor desarrollo y vigor de las tratadas con NPsCuO respecto a los controles, a ambas dosis aplicadas. (Figuras 20 y 21).

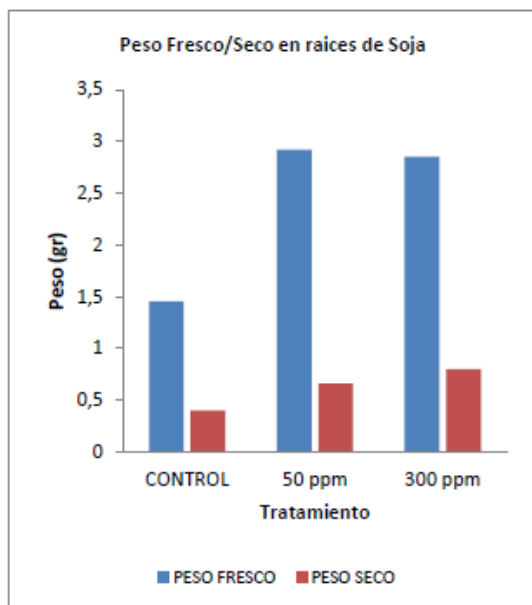


Figura 20

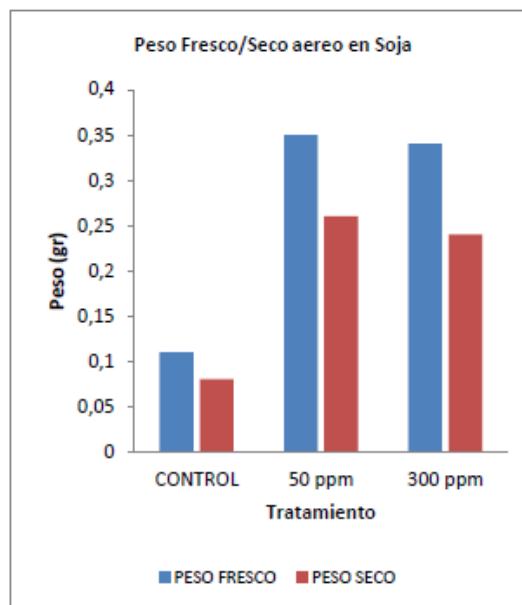


Figura 21

6. Vigor

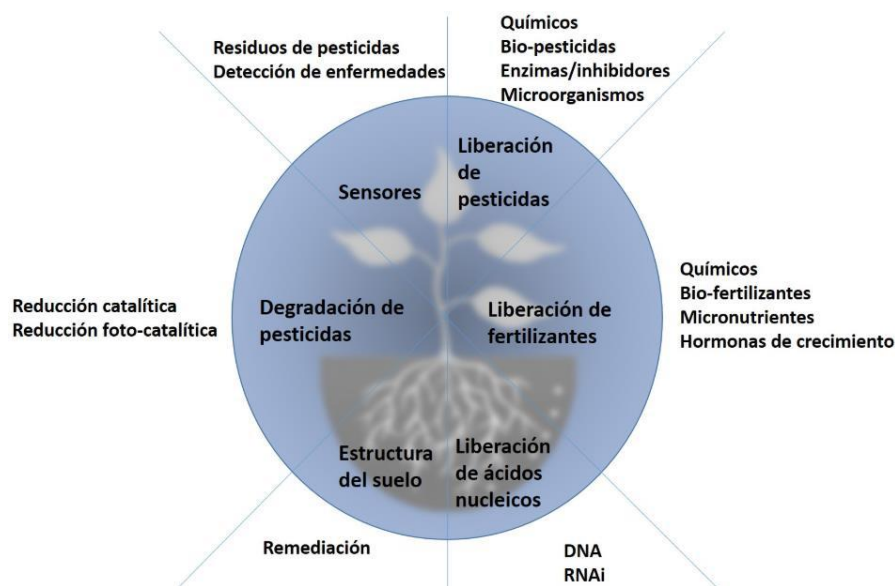
Aplicando la fórmula para cálculo de vigor en plantas según Abdul-Baki and Anderson (1973), los resultados indicaron para proto, aumentos del 21,71% y 5,70% y en soja, incrementos del 26,71% y 30,86% con la aplicación de dosis alta y baja de NPsCuO, respectivamente.

DISCUSIÓN

La producción agrícola se enfrenta a diversos desafíos, entre ellos los bajos incrementos en el rendimiento de los cultivos, la reducida eficiencia del uso de nutrientes, la disminución de materia orgánica del suelo, deficiencias multinutricionales, el cambio climático, la reducción de la disponibilidad de tierras cultivables y la falta de agua para riego. Para dar solución a algunos de estos problemas, existe la necesidad de explorar tecnologías de vanguardia, tal como la

nanotecnología (NT), para contribuir a aplicar la cantidad correcta de nutrientes y plaguicidas que promueven la productividad, y al mismo tiempo garantizar la seguridad del ambiente (Srilatha, 2011).

En la Figura 22 se muestra un esquema que ilustra las diferentes aplicaciones potenciales de la NT en diversos aspectos de la agricultura moderna (Ghormade *et al.*, 2011).



Las NPs también están siendo empleadas para el control de enfermedades en plantas en FICAUCA y el INBIOTEC, y en este contexto, ofrecen una gran oportunidad para desarrollar nuevos productos (Fuertes et al., 2025; Gallo et al. 2025).

En Argentina, los insumos biológicos están ganando cada vez mayor protagonismo en la agricultura como herramientas complementarias o alternativas al uso de productos químicos (CASAFE, Congreso de Biológicos 2025). En nuestro país, existe un interés creciente por parte de los productores y empresas en el uso de insumos biológicos, pero también revelan brechas de conocimiento y necesidades técnicas, que podrían abordarse, para facilitar su incorporación efectiva en los sistemas productivos (CASAFE, 2025). Los resultados obtenidos en este trabajo constituyen un nuevo aporte en el tema, al confirmar el potencial de las nanopartículas de cobre de síntesis biológica como una herramienta innovadora y eficiente para mejorar el crecimiento

inicial de los cultivos de soja y poroto bajo condiciones controladas, y sería interesante a futuro extrapolar estos resultados en cultivos bajo condiciones a campo. La respuesta observada, particularmente en soja a dosis bajas (50 ppm), coincide con estudios previos que muestran mayor eficiencia a bajas concentraciones debido a una posible toxicidad leve a dosis elevadas. En el caso del poroto, la mayor efectividad fue a 300 ppm, sugiriendo diferencias en la sensibilidad entre especies.

Las NPs permitieron una mejora en el vigor general de las plántulas, en línea con los hallazgos de Arredondo (2021), quien también señala un mayor desarrollo radicular, altura y biomasa en plantas tratadas con CuO. Respecto a la metodología de aplicación de las NPs utilizada en este trabajo, la técnica del pelleteado fue adecuada para lograr una distribución homogénea de las nanopartículas en las semillas en ambos cultivos. Esta observación está en concordancia con los resultados informados por Ramírez y López, (2022). Esta estrategia de aplicación permitiría integrar fácilmente las NPs con otros insumos agronómicos como curasemillas o inoculantes a campo, lo cual representa a priori una ventaja práctica y económica para el productor. Asimismo, el uso de NPs obtenidas por síntesis verde aporta beneficios ambientales, dado que reducen significativamente el uso de agroquímicos convencionales y su huella de carbono, promoviendo un modelo de agricultura más limpia y alineada con los nuevos estándares internacionales. (CASAFE, 2025).

Adicionalmente, se subraya que las nanopartículas obtenidas mediante síntesis biológica presentan ventajas destacables, especialmente por su capacidad de liberar compuestos activos de forma gradual, mejorando la eficiencia en el uso de fertilizantes y productos fitosanitarios. Esta propiedad permite además de reducir la cantidad de insumos aplicados, un menor impacto ambiental (González et al., 2023).

Otra ventaja operativa es la compatibilidad potencial de este método con otros tratamientos agrícolas habituales, como curasemillas o inoculantes, lo que abre la posibilidad de una aplicación conjunta. No obstante, este trabajo no abordó la interacción entre las NPs y otros insumos, por lo que se sugiere su evaluación en futuras investigaciones. La facilidad de aplicación y el bajo

volumen requerido posicionan a esta tecnología como una opción accesible y económicamente viable para los sistemas de producción actuales.

Adicionalmente la implementación de nanopartículas de origen biológico no solo reduce el impacto ambiental al momento de su uso en campo, sino también a lo largo de toda su cadena de producción. Al tratarse de una “síntesis verde”, las emisiones de carbono asociadas a su fabricación son considerablemente menores en comparación con los fertilizantes tradicionales. Además, el tamaño reducido de las NPs permite su aplicación en dosis mínimas, lo que simplifica su manipulación, transporte y almacenamiento. El menor uso de agroquímicos y la mayor eficiencia en el uso de recursos naturales contribuyen directamente a prácticas agrícolas más sostenibles. Este cambio es particularmente relevante en el contexto actual, donde los consumidores, especialmente en mercados internacionales, demandan productos con bajo impacto ambiental. (CASAFE, 2025)

En este sentido, Argentina —como país exportador de materias primas— tiene la oportunidad de posicionarse estratégicamente frente a estas nuevas exigencias. A su vez, el uso de tecnologías de bajo impacto como las NPs podría facilitar el acceso a mercados de carbono y otros incentivos vinculados a prácticas sustentables, lo cual representa una ventaja competitiva a largo plazo para el sector agropecuario nacional.

Finalmente, se señala que, si bien los resultados obtenidos en este trabajo indican efectos positivos en términos de crecimiento y desarrollo vegetal, es importante señalar que este estudio no incluyó una evaluación toxicológica detallada de las bionanopartículas de Cu aplicadas, fundamental para garantizar que la introducción de estas tecnologías no afecte negativamente la salud del ambiente o del consumidor final. La literatura consultada en este sentido señala que, dependiendo de la concentración y el tipo de nanopartícula, podrían existir efectos adversos a nivel celular o sobre la microbiota del suelo (Rajput et al., 2018).

La bibliografía consultada indica que el exceso de Cu puede producir una reducción en la biomasa de la parte aérea y radicular de las plantas (Wojcik y Tukiendorf, 2003; Lequeux et al., 2010), clorosis y necrosis de las hojas (Drazkiewicz y col., 2004; Bouazizi et al., 2010), disminución de la viabilidad de las células de la raíz (Rodrigo-Moreno et al., 2013), rediseño del sistema radicular,

alteración del patrón de auxinas, cambios en la deposición de lignina (Lequeux et al., 2010) e inhibición de la germinación. El exceso de Cu también afecta a la actividad fotosintética (Yruela, 2005, 2009, 2013), causa peroxidación de lípidos, daños en el ADN y proteínas, afecta a la adquisición de otros nutrientes esenciales (Adrees et al., 2015) y favorece la producción de ROS y estrés oxidativo (Yruela, 2009; Chaffai y Koyama, 2011; Sethy y Ghosh, 2013). Algunos procesos dependientes de Cu reducen el oxígeno a superóxido (O_2^-) o peróxido de hidrógeno (H_2O_2), moléculas que tienen, por sí mismas, una citotoxicidad limitada, pero que pueden ser sustratos para la producción de radicales hidroxilos (OH^-), que no pueden ser eliminados enzimáticamente y son los mayores responsables del daño oxidativo en los sistemas biológicos (Robinson y Winge, 2010; Ravety Pilon, 2013).

Por lo tanto, futuras investigaciones deberán contemplar ensayos complementarios de toxicidad crónica, bioacumulación y efectos ecotoxicológicos tanto en las plantas como en los organismos asociados al agroecosistema. Por otra parte, sería interesante explorar diferentes momentos, dosis y métodos de aplicación, así como probar su efecto en otros cultivos de importancia agrícola para ampliar su potencial uso.

CONCLUSION

El presente trabajo demuestra que las nanopartículas de cobre obtenidas mediante síntesis biológica constituyen una tecnología innovadora y efectiva para promover el crecimiento y desarrollo inicial de cultivos claves como soja y poroto. Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación de estas nanopartículas, principalmente a través de la técnica de peleteado de semillas, mejora significativamente parámetros morfométricos y fisiológicos, como la velocidad germinativa, longitud radicular, vigor, contenido de clorofila y biomasa aérea, con variaciones en la respuesta según la especie y la dosis aplicada.

Estos hallazgos respaldan el uso potencial de las bionanopartículas como estimulantes eficientes en el contexto de agricultura sustentable, aportando beneficios ambientales al reducir la

dependencia de agroquímicos convencionales y disminuir la huella de carbono. Asimismo, la utilización de síntesis verde para la obtención de nanopartículas subraya la importancia de métodos amigables con el medio ambiente y compatibles con las demandas actuales de producción agrícola responsable.

En definitiva, esta investigación abre nuevas perspectivas promisorias para el desarrollo de prácticas agrícolas más limpias, eficientes y sostenibles en Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Zia-Ur-Rehman, M., Irshad, M. K., & Bharwana, S. (2015). The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 8148–8162. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4496-5>
- Alloway, B. J. (2008). *Micronutrients and crop production: An introduction*. En B. J. Alloway (Ed.), *Micronutrient deficiencies in global crop production* (pp. 1–39). Springer.
- Arredondo, P., Hernández, J., Castillo, F., & González, A. (2020). Efecto de nanopartículas de óxido de cobre en el crecimiento de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(3), 549–561.
- Bhushan, B. (2017). *Springer Handbook of Nanotechnology* (4.^a ed.). Springer.
- CASAFE. (2025). Congreso CASAFE. Biológicos. 12 de junio 2025. Puerto Norte, Rosario, Santa Fe.
- Consolo, V. F., SAFE Torres-Nicolini, A., & Alvarez, V. A. (2020). Mycosynthetized Ag, CuO and ZnO nanoparticles from a promising *Trichoderma harzianum* strain and their antifungal potential against important phytopathogens. *Scientific Reports*, 10(1), 20499.
- Drazkiewicz, M., Skorzynska-Polit, E., and Krupa, Z. (2004). Copper-induced oxidative stress and antioxidant defense in *Arabidopsis thaliana*. *Biometals*. 17(4):379-387.
- Fuertes, G., Martínez, I., Perelló, A. (2025). Tratamiento de semillas con teràpicos químicos sintéticos y de formulación biológica para el control de mancha en red de la cebada. Trabajo final de carrera UCA-Cs Agrarias. En realización 2025.
- Gallo, M. B., Martínez, S., Perelló, A. E., Alvarez, V. A., & Consolo, V. F. (2025). Green synthesis of copper oxide nanoparticles from *Trichoderma harzianum*: A novel approach for managing wheat blast disease. Enviado para publicación. Mundonano.

- **INTA.** (2020). Cadena de valor del poroto en el Noroeste Argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documentos/cadena-de-valor-del-poroto-noa>
- **INTA.** (2021). La cadena de la soja: Aportes al desarrollo económico y productivo argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/inta/cr-buenosaires-norte/indicadores-economicos-e-informes-tecnicos/evolucion-de-la-cadena-de-soja>
- **Lamichhane, J. R., Osdaghi, E., Behlau, F., Köhl, J., Jones, J. B., & Aubertot, J. N.** (2018). Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5), 1–24.
- **Lequeux, H., Hermans, C., Lutt, S., and Verbruggen, N.** (2010). Response to copper excess in *Arabidopsis thaliana*: Impact on the root system architecture, hormone distribution, lignin accumulation and mineral profile. *Plant. Physiol. Biochem.* 48(8):673-682.
- **Lopez-Lima, D A., Mtz-Enriquez, A. I., Carrion, G., Basurto-Cereceda, S., & Pariona, N.** (2021). The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for *Fusarium* wilt and plant growth promoter.
- **Martínez-Rodríguez, L. A.** (2015). *Micromorfología de tallo y raíz de plantas de maíz y frijol tratadas con nanopartículas de titanio, hierro y zinc, bajo invernadero* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6844/T20520%20MARTINEZ%20RODRIGUEZ%2C%20LUIS%20ALBERTO%2063436.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- **Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente Urbina, B. A., & Lira Saldívar, R. H.** (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 8(17), 140-141.

- **Mercuri, O., Sainz Rozas, H., & Echeverría, H.** (2015). El cultivo de soja en la Argentina: Su historia, expansión y manejo agronómico. INTA Ediciones. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documento/cultivo-de-soja-en-argentina>
- **Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.** (2023). Informe anual de cultivos extensivos 2022/2023: Soja. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://www.magyp.gob.ar/>
- **Perelló, A., Friedlmeier, L., Fuertes, G., Martínez, I., Gallo, M. B., & Consolo, V. F.** (2025). Impacto de bionanopartículas de zinc (NPs-ZnO) como promotoras del crecimiento y control de enfermedades en cereales. En *Congreso CASAFE Biológicos*, Puerto Norte, Santa Fe, 12 de junio de 2025.
- **Rajput, V. D., Minkina, T., Mandzhieva, S., Sushkova, S., Mandzhieva, S., & Ok, Y. S.** (2018). Impact of engineered nanoparticles on soil microbial community and their ecological effects: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19216–19226.
- **Robinson, N. J., and Winge, D. R.** (2010). Copper metallochaperones. *Annu. Rev. Biochem.* 79:537-562.
- **Rodrigo-Moreno, A., Andrés-Colás, N., Poschenrieder, C., Günse, B., Peñarrubia, L., & Shabala, S.** (2013). Calcium and potassium permeable plasma membrane transporters are activated by copper in *Arabidopsis* root tips: Linking copper transport with cytosolic hydroxyl radical production. *Plant, Cell & Environment*, 36(4), 844–855. <https://doi.org/10.1111/pce.12017>
- **Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA).** (2021). Uso de productos fitosanitarios a base de cobre en la agricultura. Buenos Aires: SENASA. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/senasa>
- **Srilatha, B.** (2011). Nanotechnology in Agriculture. *J. Nanomedic Nanotechnol.* 2:123-128.

- **Singh, J., Dutta, T., Kim, K.-H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P.** (2018). 'Green' synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 84.
- **Tarafdar, J., Raliya, R., Mahawar, H., & Rathore, I.** (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3(3), 257-262.
- **Wang, Z., Xie, X., Zhao, J., Liu, X., Feng, W., White, J., & Xing, B.** (2012). Xylem and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science & Technology*, 46(8), 4434-4441.
- **Wojcik, M., Tukiendorf, A.** (2003). Response of wild type of *Arabidopsis thaliana* to copper stress. *Biol. Plantarum*. 46(1):76-84.
- **Yruela, I.** (2005). Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17(1):145-156.
- **Yruela, I.** (2013). Transition metals in plant photosynthesis. *Metallomics*. 5(9):1090-1109.
- **Yruela, I.** (2009). Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Funct. Plant. Biol.* 36(5):409-430.

ANEXO:

1-Longitud radicular en poroto

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Long radicular	36	0,20	0,15	22,52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	250,66	2	125,33	4,13	0,0250
Trat	250,66	2	125,33	4,13	0,0250
Error	1001,03	33	30,33		
Total	1251,69	35			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=5,55960

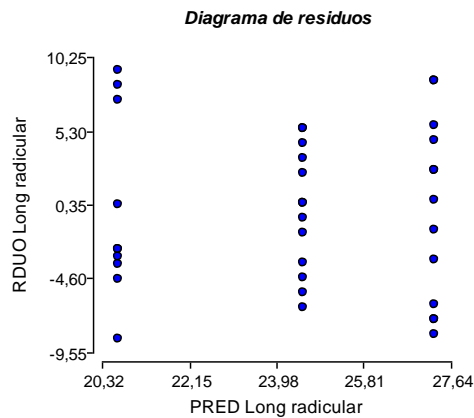
Error: 30,3341 gl: 33

Trat	Mediasn	E.E.		
Control	20,65	10	1,74	A
50 ppm	24,54	13	1,53	A B
300 ppm	27,31	13	1,53	B

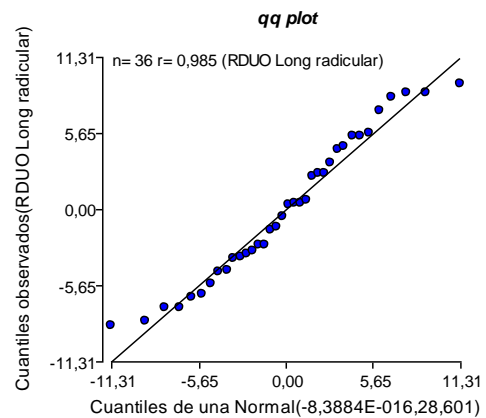
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Análisis de supuestos:

Homocedasticidad:



Normalidad:



2-Longitud radicular en soja

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
----------	---	----------------	-------------------	----

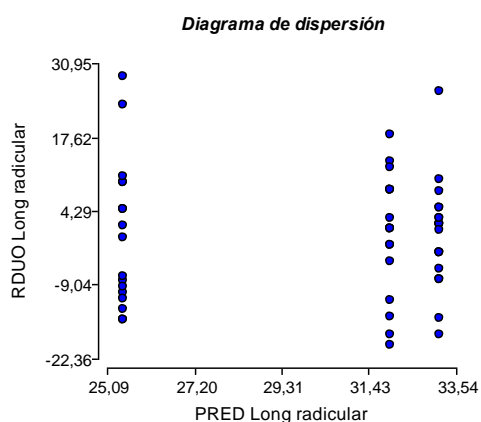
Long radicular 53 0,08 0,05 37,48

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

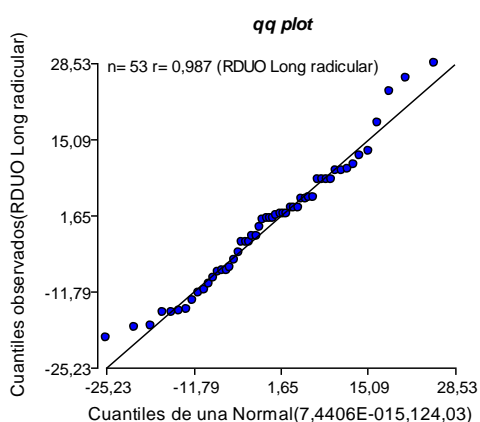
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	597,47	2	298,73	2,32	0,1092
Tratamiento	597,47	2	298,73	2,32	0,1092
Error	6449,70	50	128,99		
Total	7047,17	52			

Análisis de supuestos

Homocedasticidad



Normalidad



3-Efecto de las NPs en la altura de las plantas y número de hojas – Poroto-

Análisis de la varianza

L aerea

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
L aerea	36	0,03	0,00	18,85

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	31,98	2	15,99	0,56	0,5783
Tratamiento	31,98	2	15,99	0,56	0,5783
Error	947,60	33	28,72		
Total	979,58	35			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=4,48493

Error: 28,7152 gl: 33

Tratamiento	Mediasn	E.E.
50 ppm	27,42	1,49 A
Control	28,20	1,69 A
300 ppm	29,62	1,49 A

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

N hojas

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N hojas	36	0,12	0,07	8,63

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,80	2	0,40	2,23	0,1234
Tratamiento	0,80	2	0,40	2,23	0,1234
Error	5,95	33	0,18		
Total	6,75	35			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,35527

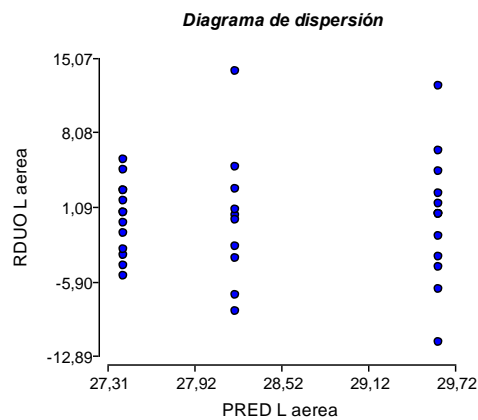
Error: 0,1802 gl: 33

Tratamiento	Mediasn	E.E.		
Control	4,70	10	0,13	A
50 ppm	4,92	13	0,12	A B
300 ppm	5,08	13	0,12	B

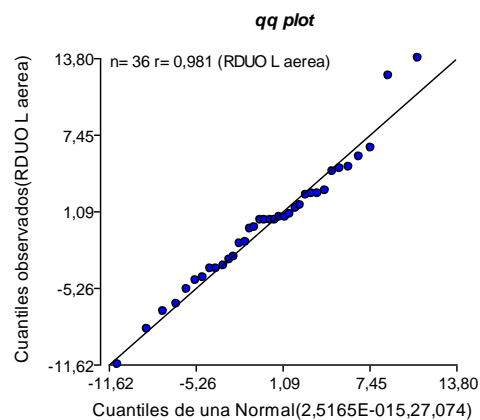
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

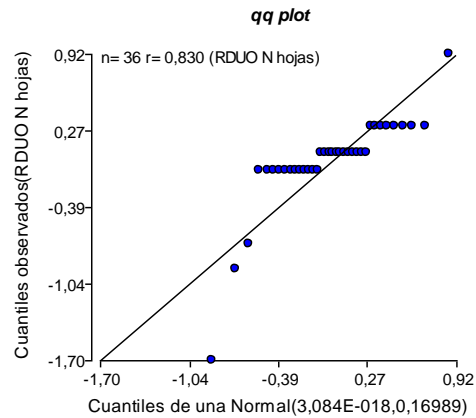
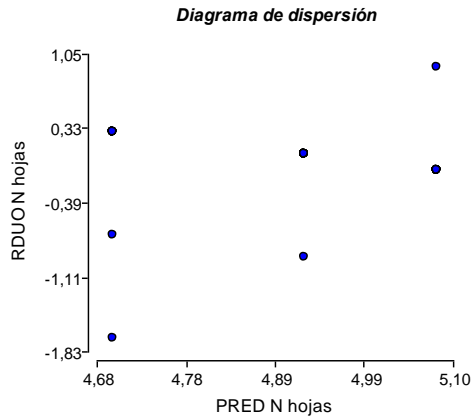
Análisis de supuestos

Homocedasticidad



Normalidad





4-Efecto de las NPs en la altura de las plantas y número de hojas – Soja -.

Análisis de la varianza

Longitud aerea

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Longitud aerea	54	0,35	0,33	14,11

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	792,01	2	396,00	13,92	<0,0001
Tratamiento	792,01	2	396,00	13,92	<0,0001
Error	1450,75	51	28,45		
Total	2242,76	53			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,58087

Error: 28,4461 gl: 51

Tratamiento	Mediasn	E.E.	
Control	32,19	1,33	A
300 ppm	38,74	1,22	B
50 ppm	41,58	1,22	B

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

Nº de hojas

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Nº de hojas	54	0,31	0,28	10,46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6,00	2	3,00	11,49	0,0001
Tratamiento	6,00	2	3,00	11,49	0,0001
Error	13,33	51	0,26		
Total	19,33	53			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,34323

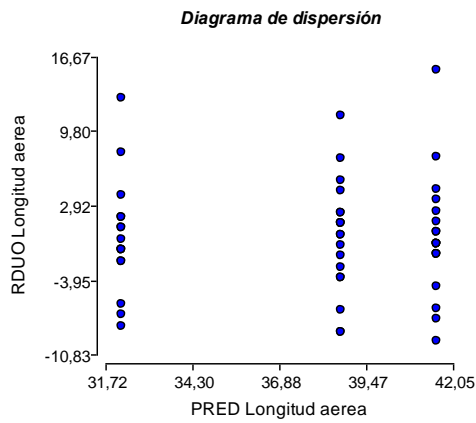
Error: 0,2614 gl: 51

Tratamiento	Mediasn	E.E.	
Control	4,38 16	0,13	A
50 ppm	5,11 19	0,12	B
300 ppm	5,11 19	0,12	B

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

Análisis de supuestos

Homocedasticidad



Normalidad

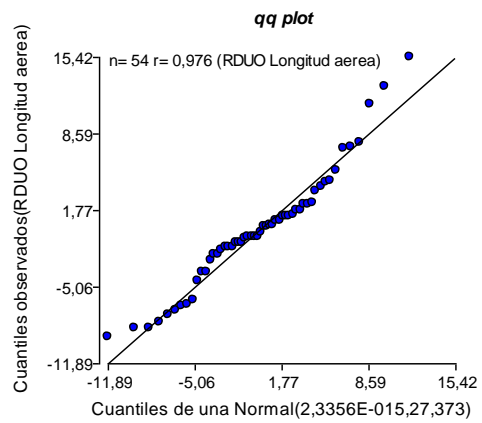
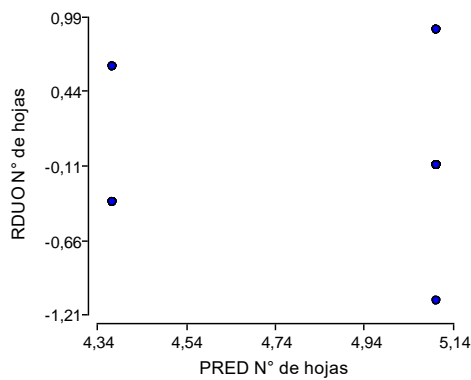
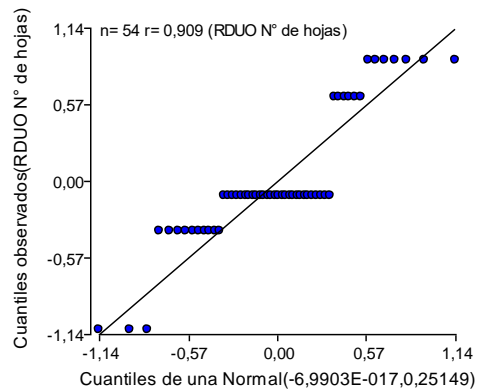


Diagrama de dispersión



qq plot



5-Contenido de clorofila en Poroto

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Contenido de clorofila	84	0,13	0,11	19,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	52,90	2	26,45	5,94	0,0039
Tratamiento	52,90	2	26,45	5,94	0,0039
Error	360,88	81	4,46		
Total	413,79	83			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1,12244

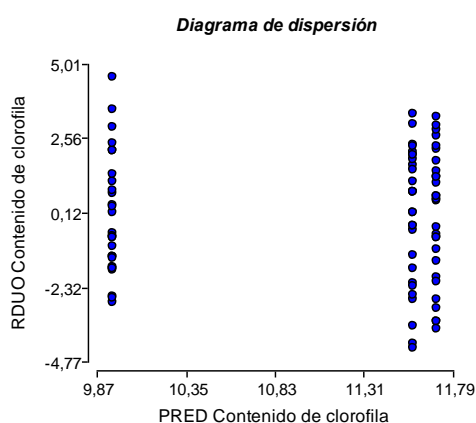
Error: 4,4554 gl: 81

Tratamiento	Mediasn	E.E.	
Control	9,96	28	0,40 A
300 ppm	11,57	28	0,40 B
50 ppm	11,70	28	0,40 B

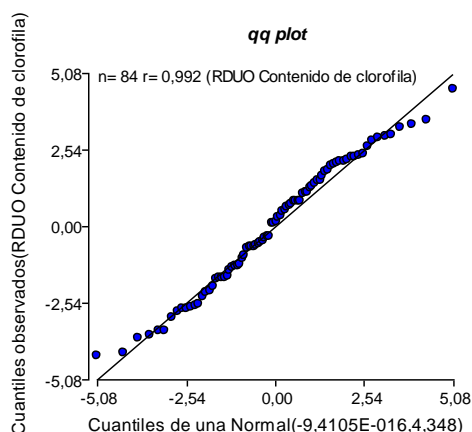
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Análisis de supuestos

Homocedasticidad



Normalidad



6-Contenido de clorofila -Soja

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Contenido de clorofila	210	0,02	0,02	30,86

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	41,74	2	20,87	2,62	0,0754
Tratamiento	41,74	2	20,87	2,62	0,0754
Error	1650,65	207	7,97		
Total	1692,39	209			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,94103

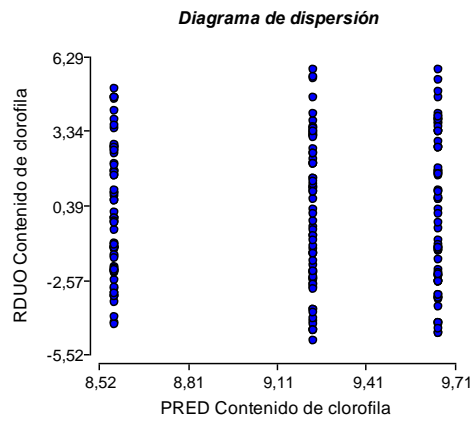
Error: 7,9741 gl: 207

Tratamiento	Mediasn	E.E.		
Control	8,57	70	0,34	A
300 ppm	9,23	70	0,34	A
50 ppm	9,65	70	0,34	B

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

Análisis de supuestos

Homocedasticidad



Normalidad

