

# Influence of the concentration of iron oxide (FeO) nanonutrients on the germination process of *Chenopodium quinoa*

David Asmat-Campos, Dr. <sup>1, 2, \*</sup> [0000-0003-1144-1322], Luisa Juárez-Cortijo, MSc. <sup>2</sup> [0000-0002-2468-3550], Daniel Delfín-Narciso, MSc. <sup>2</sup> [0000-0002-9766-4684], and A. Carreño-Ortega, Dr. <sup>3</sup> [0000-0003-2492-9642]

<sup>1</sup> Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú, \*[davidasmat88@hotmail.com](mailto:davidasmat88@hotmail.com), [david.asmat@upn.edu.pe](mailto:david.asmat@upn.edu.pe)

<sup>2</sup> Grupo de investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, Centro de Investigación CIMEDES, Almería, España

*Abstract– At present, the agricultural sector has become dependent on the use of synthetic fertilizers, with the aim of supplying nutrients and promoting the productivity of various crops. However, its prolonged application has been shown to be detrimental to the soil and the microbiome. Nanotechnology is presented as an efficient and ecological alternative as nanonutrients, which allows the slow and sustained release of nutrients. This research evaluates the influence of the concentration of iron oxide nanoparticles (FeO NP) in the germination process of *Chenopodium quinoa*. The nanoparticles were obtained by a sustainable method, achieving high monodispersity and spherical geometry. The application as nanofertilizers showed a significant effect compared to the control sample, which allows us to determine that the size of the nanomaterial promotes the improvement of nutrient absorption mechanisms, in addition to contributing at an elemental level to root development and germination rate.*

*Keywords- Nanofertilizers, green synthesis, iron oxide, *Chenopodium quinoa*.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Influencia de la concentración de nanonutrientes de óxido de hierro (FeO) en el proceso de germinación de *Chenopodium quinoa*

David Asmat-Campos, Dr. <sup>1, 2, \*</sup> [0000-0003-1144-1322], Luisa Juárez-Cortijo, MSc. <sup>2</sup> [0000-0002-2468-3550], Daniel Delfín-Narciso, MSc. <sup>2</sup> [0000-0002-9766-4684], and A. Carreño-Ortega, Dr. <sup>3</sup> [0000-0003-2492-9642]

<sup>1</sup> Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú, \*[davidasm88@hotmail.com](mailto:davidasm88@hotmail.com), [david.asmat@upn.edu.pe](mailto:david.asmat@upn.edu.pe)

<sup>2</sup> Grupo de investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, Centro de Investigación CIMEDES, Almería, España

**Abstract**– *En la actualidad el sector agrícola se ha vuelto dependiente del uso de fertilizantes sintéticos, con el objetivo de suministrar nutrientes y promover la productividad de diversos cultivos. Sin embargo, se ha demostrado que su aplicación prolongada es perjudicial para el suelo y el microbioma. La nanotecnología se presenta como una alternativa eficiente y ecológica como nanonutrientes, el cual permite la liberación lenta y sostenida de nutrientes. Esta investigación evalúa la influencia de la concentración de nanopartículas de óxido de hierro (FeO NP) en el proceso germinativo de *Chenopodium quinoa*. Las nanopartículas fueron obtenidas por un método sostenible, lográndose una alta monodispersidad y con geometría esférica. La aplicación en calidad de nanofertilizantes mostró un efecto significativo respecto a la muestra control, lo cual permite determinar que el tamaño del nanomaterial promueve la mejora de los mecanismos de absorción de nutrientes, además de aportar a nivel elemental en el desarrollo radicular y tasa de germinación.*

**Keywords**- *Nanofertilizantes, síntesis verde, óxido de hierro, *Chenopodium quinoa*.*

## I. INTRODUCCIÓN

La Quinoa (*Chenopodium quinoa*), con gran biodiversidad en el Perú debido a los distintos pisos ecológicos que presenta el país y que también es cultivada en varias regiones altoandinas de América del Sur, es un pseudo cereal muy consumido debido a sus excelentes valores nutricionales [1] Los componentes activos, como minerales, vitaminas, ácidos grasos y antioxidantes convierten a la quinoa en un alimento funcional para la dieta humana. Minerales como calcio, hierro, zinc, magnesio y manganeso, les dan a estos granos un alto valor nutritivo; el calcio para los huesos y el hierro para las funciones sanguíneas, por ejemplo. Así también las propiedades antioxidantes de la quinoa conferidas por la vitamina E y los

ácidos grasos ayudan a los procesos celulares como la actividad neuronal [2].

Dado los grandes beneficios que presenta la *Chenopodium quinoa*, su cultivo se ha extendido representando un área de 188,878 ha. produciendo alrededor de 175,188 toneladas [3]. Con la demanda mundial en aumento, los aspectos relacionados al cultivo son fundamentales. Los estudios referentes a la nutrición y manejo de agua son necesarios para obtener más rendimiento de grano con mejores componentes nutricionales. La emergencia de las plántulas representa otro importante factor debido a que afecta la población de plantas, el rendimiento y la calidad de grano [4].

La nanotecnología representa una nueva alternativa para la agricultura. Diversos trabajos muestran la acción de las nanopartículas (NP) como mediadoras en el proceso germinación y emergencia de diversas plantas [5]–[7]. Dentro de los procesos de síntesis de NP, el método de síntesis verde presenta grandes ventajas debido a su mínimo impacto ambiental, baja toxicidad y menores costos. En este método de síntesis se utilizan reductores orgánicos como los extractos de plantas entre otros [8].

Nanopartículas de óxido de hierro esféricas con tamaño promedio de 20 nm fueron utilizadas como fertilizante en el crecimiento y desarrollo de maní (*Arachis hypogaea*) logrando mostrar que las NPs promueven el crecimiento del maní al regular el contenido de fitohormonas y la actividad de enzimas antioxidantes. Los resultados mostraron que las NP aumentaron de la longitud de la raíz, altura de la planta, y la biomasa [9]. La aplicación de nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, con un tamaño de entre 50 y 100 nm, a plántulas de trigo (*Triticum aestivum*) durante cinco días en hidroponía mostraron que las NP logran un aumento de la longitud de brotes y raíces sobre el control [10]. Así mismo nanopartículas de óxido de hierro a las concentraciones de 0, 5, 10, 15, y 20 mg L<sup>-1</sup> se utilizaron en semillas de trigo (*Triticum aestivum*). Las plantas tratadas con NP estaban sanas, más verdes y crecieron bien sobre las plantas de control. Los resultados mostraron que la altura de las plantas de trigo y la longitud de las espigas aumentaron, especialmente

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

con el tratamiento aquellas con concentraciones de NPs más alto [11].

Dada la necesidad de un mayor conocimiento sobre la eficiencia de las nanopartículas en una mayor tasa de germinación se planteó como objetivo de investigación determinar el efecto de nanopartículas de óxido de hierro producidas por un método de síntesis verde sobre las características germinativas de *Chenopodium quinoa*.

## II. METODOLOGÍA

### 1. Síntesis verde de nanopartículas FeO

Para la síntesis se partió de sulfato ferroso del laboratorio Himedia. Se utilizó agua ultrapura (Thermo Scientific, Barnstead Smart2Pure, MA, EE. UU.) durante todo el experimento.

La metodología de síntesis de FeO NP, fue previamente reportado como solicitud de patente (002804-2022/DIN - INDECOPI), por uno de los investigadores de este manuscrito. Para el proceso de reducción, se usó como agente el extracto de *Camellia sinensis*, en donde se combinaron tanto agente reductor como precursor a temperatura ambiente y con agitación magnética, hasta finalmente llevarlo a pH 8. Para su aplicación en esta investigación, las nanopartículas obtenidas fueron lavadas tres veces por ultrasonido y suspendidas en agua ultrapura.

### 2. Inoculación de FeO NP en semillas *C. quinoa*

Las FeO NP fueron inicialmente obtenidas en coloide (muestra stock). A partir de esto, se realizaron tres diluciones en agua ultrapura y colocado durante 1 hora en ultrasonido a temperatura ambiente. Se consideraron tres grupos para el tratamiento con nanopartículas, cada grupo con un total de 50 semillas de *C. quinoa*. Las concentraciones del coloide de FeO NP se consideraron en base a su absorbancia óptica, el cual está vinculado al pico de excitón del nanomaterial (Figura 3). Las semillas fueron dispuestas en placas Petri previamente esterilizadas, y provistas con dos discos de papel filtro cuantitativo Whatman N° 42. El tratamiento consistió en la aplicación de 2 mL de coloide FeO NP con un atomizador. Asimismo, se añadió una placa Petri adicional como control, en donde las semillas estuvieron en contacto con 2 mL de agua. La evaluación de la respuesta de las semillas ante el tipo de tratamiento se hizo en intervalos de tiempo de 12 horas, con un total de 60 horas, en donde se contabilizó del número de germinados y el tamaño de radícula.

### 3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el software Microsoft Excel, con su complemento RealStats. Los datos de las variables porcentaje de germinación se analizaron mediante el

diseño ANOVA unifactorial con un 95% de nivel de confianza ( $p < 0,05$ ). La evaluación de los resultados del proceso germinativo se presenta como el promedio estadístico acompañado de su desviación estándar.

## III. RESULTADOS

En la actualidad existen diversos métodos de síntesis verde de nanopartículas FeO [12]–[14], en donde se suele destacar en cada caso parámetros como la monodispersidad, buen manejo de la geometría y el grado de pureza del nanomaterial. Este método se caracteriza por simplificar la ruta, reducir los costos de producción y aminorar la contaminación. La Figura 1 muestra el resultado por microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM, por sus siglas en inglés), en donde se puede evidenciar nanopartículas aglomeradas, con morfología esférica definida y con similitud de tamaños entre sí, con valor de  $40.75 \pm 2.3$  nm, lo cual determina el potencial reductor del extracto orgánico usado. Otros autores han reportado nanopartículas con diámetros mayores [15]–[17]. Los aglomerados muy posiblemente son debido a las fuerzas de interacción iónica existente a nivel de nanomateriales.

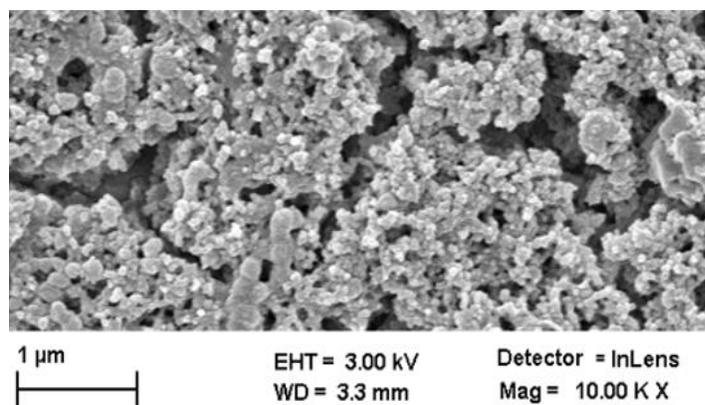


Figura 1. Microscopía electrónica de barrido (FESEM) de las nanopartículas de FeO.

El proceso de reducción de los precursores usados para la obtención de nanopartículas está limitado en muchos casos a tener reacciones incompletas, y presentar trazas de otros elementos, como producto de algunos compuestos usados durante la reacción, o provenientes de minerales orgánicos del extracto. En tal sentido, el balance de reacción a partir de los compuestos usados es importante, específicamente para las aplicaciones en donde se debe de garantizar la monodisponibilidad y restringir posibles otros efectos. La Figura 2, muestra el resultado de análisis elemental por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), de la muestra stock de FeO NP, en donde se puede evidenciar la presencia de los picos del hierro (Fe), sin presentar ningún otro elemento. La presencia del oxígeno es clásica debido a la naturaleza del análisis de la muestra. Este resultado garantiza la

eficiente reducción del precursor. Otros métodos biogénicos reportan procesos de reducción, pero incompleta, además de la presencia de trazas inorgánicas, lo que conlleva a procesos de lavado para su posterior aplicación [18]–[20].

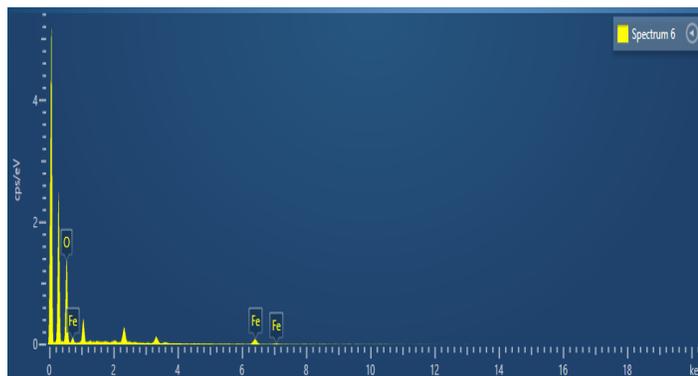


Figura 2. Análisis elemental por EDS, de las nanopartículas de FeO.

Las FeO NP fueron aplicados como nanofertilizantes, específicamente vinculados a la evaluación en el proceso germinativo, esto como nanonutrientes. Para tal caso, se han considerado un total de tres concentraciones a partir de la dilución del coloide stock. La Figura 3 muestra los espectros de absorbancia de las diluciones consideradas para este experimento, con valores de FeO-C1 = 3.81 u.a, FeO-C2= 3.41 u.a, y FeO-C3= 1.26 u.a. En todos los casos se puede evidenciar la presencia del pico de excitón en 313 nm.

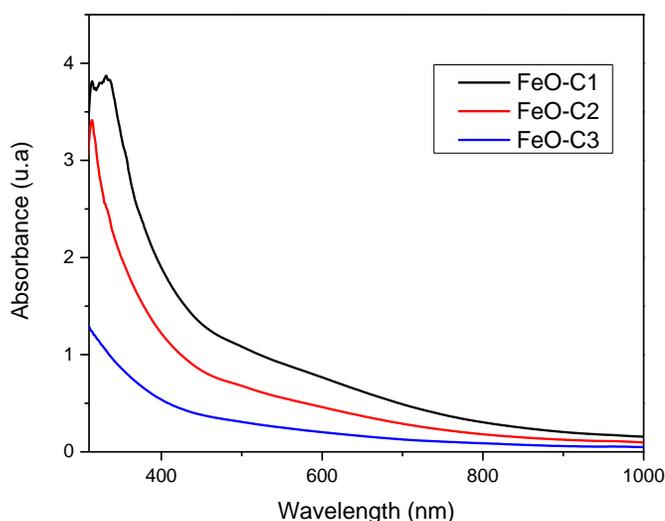


Figura 3. Análisis por espectrofotometría UV vis de las FeO NP, a las tres concentraciones

A partir del resultado espectrofotométrico del coloide FeO-C1, se ha diseñado la gráfica TAUC (Figura 4), con el objetivo de determinar el valor del ancho de banda. En tal sentido, el valor

obtenido es de 3.23 eV, resultado que está muy por encima del valor normal (2.2 eV) [21]. Con respecto a esto, Wang et al [22] informó para casos similares vinculados a otro tipo de nanopartícula de tipo óxido metálico (ZnO) que sí es posible obtener este tipo de valores, siempre y cuando el diámetro de las NP tenga valores comparables con el radio de excitón de Bohr ( $\approx 2,3$  nm), lo cual implica un desplazamiento del 'band gap' hacia el azul (respecto a valores de  $\approx 3.37$  eV), lográndose gracias a fuertes confinamientos cuánticos, que para efectos prácticos, es muy difícil de sintetizar nanopartículas con dimensiones por debajo del radio de Bohr. Esta información es válida para el contexto de las FeO NP.

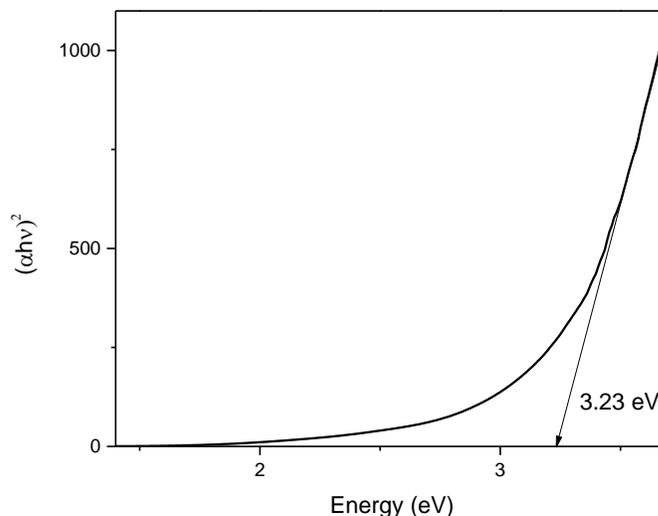


Figura 4. Gráfica TAUC, para el cálculo de 'band gap' de las FeO NP.

En la actualidad, se vienen realizando investigaciones en donde aplican diferentes tipos de nanomateriales, con el objetivo de aportar a una de las grandes amenazas vinculados a la productividad vegetal y la dieta humana, y esto es el añadir nanonutrientes para la biofortificación de la planta, mejorando los mecanismos de absorción en los diversos tipos de cultivo [23]. Además, hay evidencia científica en donde las NP se pueden aplicar como tratamientos en semilla, aspersión foliar o en el suelo [24], [25].

### Porcentaje de germinación:

Se evaluó el porcentaje de germinación en base a la influencia de concentración coloidal de NP. Se consideraron dos datos, el primero a las 12 primeras horas y al finalizar (60 horas), en este caso, se consideró finalización cuando ya no presento desarrollo radicular. La evaluación inicial mostró diferencia significativa entre la muestra control y aquellas a las que se le aplicó el tratamiento, para tal caso, la muestra control presentó un 72% de semillas germinadas, mientras que para las muestras FeO-C2 y FeO-C3 fueron valores similares (82%). Una vez finalizado

el proceso, la diferencia significativa se mantuvo, con valor de 94% para el control, pero con una ligera variación respecto a las muestras con tratamiento, debido a que los valores más altos fueron para las muestras FeO-C1 y FeO-C2 con 98% de semillas germinadas. Este efecto tiene como mecanismo principal a su tamaño, y características como su gran área superficial y esencialmente una relación superficie/masa extremadamente alta, lo que las hace únicas en comportamiento y pueden modificar las propiedades fisicoquímicas de los materiales u organismos [26]. La aplicación inicial como recubrimiento en semillas, tienen el mecanismo específico de abrir camino a través de ‘nanoporos’ superficiales, facilitando una mayor difusión para la penetración de agua, oxígeno y aumentando la accesibilidad de nutrientes mejorando la germinación, además de estimular la síntesis de triptófano, que estimula la génesis de auxinas, citoquininas y giberelinas, todas ellas hormonas implicadas en el crecimiento y desarrollo de las plantas [27].

Esto también trae consigo la mejora en el desarrollo de la raíz, la longitud de los brotes y el crecimiento [28].

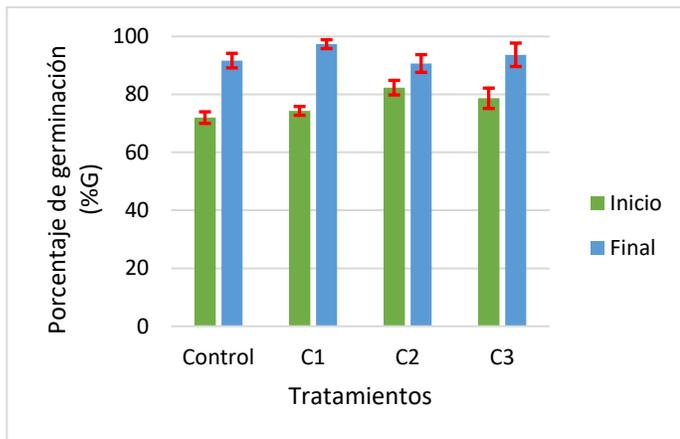


Figura 5. Porcentaje de germinación de semillas de *C. quinoa*.

También se evaluó a nivel de desarrollo radicular, la Figura 6 muestra tal influencia para las muestras control y con tratamiento. A las 12 primeras horas se puede evidenciar un notorio desarrollo radicular para la muestra FeO-C2 con una longitud de 12 mm, seguido de la muestra FeO-C1 con 1.5 mm y la muestra control 1.1 mm. La muestra FeO-C3 no mostró desarrollo radicular. Este resultado va acorde al porcentaje de germinación, en donde la muestra FeO-C2 fue la que mostró mayor actividad germinativa. Los resultados luego de transcurrido 60 horas, evidencian diferencia significativa entre únicamente los tratamientos con FeO NP, en donde la muestra FeO-C1 posee un desarrollo radicular primario de mayor longitud (39.2 mm), y a su vez es la única muestra que presenta raíces secundarias o pelos radiculares. La muestra control tiene una longitud de 36 mm. Un detalle importante se muestra en el tratamiento FeO-C3, en donde se puede evidenciar la

presencia de tres raíces seminales, esto se repitió en varias de las muestras expuestas a la misma concentración, pues su presencia ayuda a la absorción de nutrientes, por lo que se puede inferir que a mayor concentración de coloide nanoparticulado, genera una cinética de desarrollo mayor como antesala a un proceso de mayor absorción de nutrientes frente al proceso de emergencia en medio de cultivo.

Se ha informado que las FeO NP aumentan la germinación de las semillas, lo que ayuda considerablemente a que la raíz crezca y tenga un mejor desarrollo, asimismo, mejoran el contenido de clorofila, fósforo y nitrógeno [29].



Figura 6. Germinación de semillas *C. quinoa* con tratamiento control y FeO NP, (a) 12 horas de iniciado el tratamiento, (b) 60 horas.

La frecuencia de germinación en función al tiempo marca un parámetro importante, esto vinculado a la tasa de semillas germinadas y evaluadas en los intervalos de tiempo ya definidos. Es así como, la Figura 7 muestra un comportamiento acelerado y decadente para la muestra control, mientras que la muestra FeO-C2 posee una característica interesante al tener un ligero incremento en su tasa germinativa a las 32 horas de iniciado el tratamiento. Las muestras FeO-C1 y FeO-C3 tienen características similares, con menor dinamismo de decaimiento respecto al control.

La evaluación experimental vinculado al crecimiento de tallo y raíz, análisis de biomasa, han revelado en otras investigaciones una relación dependiente de la dosis y tiempo, eso debido a la absorción de  $Fe_2O_3$  [30]. En general, los óxidos metálicos como nanonutrientes en concentraciones óptimas desempeñan un papel importante sobre el rendimiento de tubérculos [31].

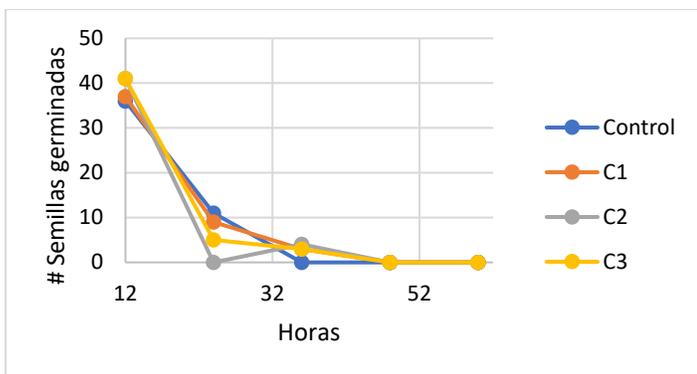


Figura 7. Tasa de germinación.

### Germinación diaria media (GDM):

Es el cálculo de la razón entre el porcentaje final de germinación (PG) y el número de días transcurridos hasta llegar al valor máximo. Dicho índice se expresa sin unidades. La Figura 8 muestra el mencionado parámetro, el que a su vez muestra diferencia significativa de los tratamientos con nanopartículas y el control. Las muestras tratadas con FeO-C1 y FeO-C3 son de bastante similitud.

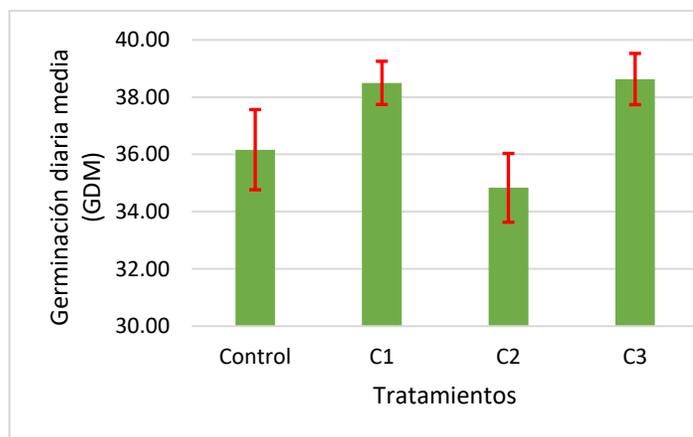


Figura 8. Germinación media diaria.

### Índice de germinación

Este parámetro provee una medida del tiempo de germinación en relación con la capacidad de germinación. Constituye un indicador de la interacción de los factores que promueven o inhiben la germinación, así como de los respectivos factores que favorecen o impiden el crecimiento de la radícula.

Para las muestras en evaluación, a las 12 primeras horas se evidenció diferencia significativa entre la muestra control (IG=0.36), y las muestras FeO-C2 y FeO-C3 con IG=0.4. Pasado las 24 horas, la muestra control tuvo una disminución

de este valor (0.22), al igual que las demás muestras con valores más diferenciados. El mecanismo de interacción nanopartícula-semilla se produce generalmente por interacción química, lo que implica la construcción de especies de oxígeno, acción del transporte de membrana, la peroxidación de lípidos y el trastorno de las células iónicas, lo que lleva a generar los cambios respecto al control [32].

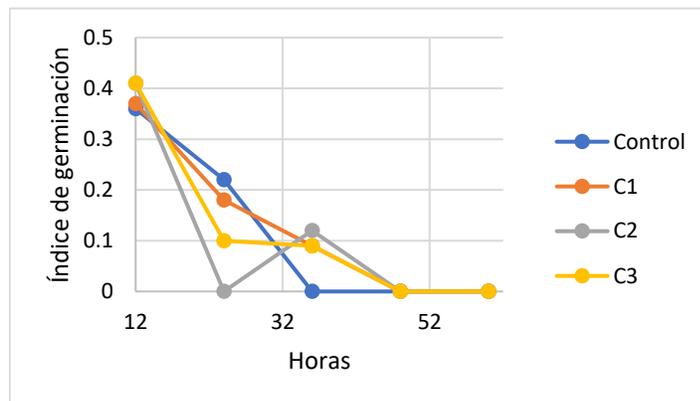


Figura 9. Índice de germinación.

En general, se sabe que el hierro es un nutriente importante en la planta, debido a que promueve su crecimiento y desarrollo [33]. La aplicación de material nanoestructurado basado en hierro mitiga la deficiencia de este mineral, pero mejorando los mecanismos de interacción debido a su tamaño y buena biocompatibilidad, y propiedades superparamagnéticas.

Autores señalan que no tan solo micronutrientes basados en hierro son esenciales para la mejora de procesos metabólicos en planta, sino también los basados en manganeso y otros tipos de minerales, lo cual apertura el desarrollo de aplicación a escala nanométrica de este tipo de elementos metálicos [34], [35]. Recientemente se ha informado que las FeO NP aplicados en la raíz tienen un efecto en el crecimiento de las raíces y el contenido de clorofila [36].

Otro caso para citar es su aplicación en plantas de *A. hypogaea*, en donde se evidenció el aumento de la longitud de la raíz, altura de la planta, biomasa y niveles de clorofila [9].

## IV. CONCLUSIONES

La síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro fue viable, mostrándose el potencial reductor del extracto de *C. sinensis*, lográndose nanoestructuras esféricas y con diámetro medio de 40.75 nm. La aplicación de estas nanopartículas coloidales en función a la variación de la concentración mostró un efecto significativo respecto a la muestra control, lo cual permite determinar que el tamaño del nanomaterial promueve la mejora de los mecanismos de absorción de nutrientes, además de aportar a nivel elemental en el desarrollo radicular y tasa de germinación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social (DIIRS) de la Universidad Privada del Norte, por el apoyo en la gestión y financiamiento para la participación en este evento internacional. Por último, y no menos importante, agradecemos a los revisores por sus correcciones y sugerencias.

## REFERENCIAS

- [1] M. Pellegrini *et al.*, “Chemical, fatty acid, polyphenolic profile, techno-functional and antioxidant properties of flours obtained from quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) seeds,” *Ind Crops Prod*, vol. 111, pp. 38–46, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.INDCROP.2017.10.006.
- [2] A. Vega-Gálvez, M. Miranda, J. Vergara, E. Uribe, L. Puente, and E. A. Martínez, “Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa willd.*), an ancient Andean grain: a review,” *J Sci Food Agric*, vol. 90, no. 15, pp. 2541–2547, Dec. 2010, doi: 10.1002/JSFA.4158.
- [3] “FAOSTAT.” <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed Feb. 25, 2023).
- [4] N. Chaudhary, S. Walia, and R. Kumar, “Functional composition, physiological effect and agronomy of future food quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*): A review,” *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 118, p. 105192, May 2023, doi: 10.1016/J.JFCA.2023.105192.
- [5] D. Asmat-Campos *et al.*, “ZnO Nanoparticles Obtained by Green Synthesis as an Alternative to Improve the Germination Characteristics of *L. esculentum*,” *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 2343, vol. 27, no. 7, p. 2343, Apr. 2022, doi: 10.3390/MOLECULES27072343.
- [6] Y. K. Jo, W. Cromwell, H. K. Jeong, J. Thorkelson, J. H. Roh, and D. B. Shin, “Use of silver nanoparticles for managing *Gibberella fujikuroi* on rice seedlings,” *Crop Protection*, vol. 74, pp. 65–69, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.CROPRO.2015.04.003.
- [7] N. Singh *et al.*, “Synthesis and characterization of metal-based nanoparticles and their effect on seed quality parameters of American varieties of cotton,” *Mater Today Proc*, vol. 69, pp. 87–95, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.08.124.
- [8] D. A. Asmat-Campos, E. E. Murga-Torres, and N. R. Checca Huaman, “Development, production and characterization of FeO nanoparticles mediated by green route,” no. 1. Aug. 18, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.52.
- [9] M. Rui *et al.*, “Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*),” *Front Plant Sci*, vol. 7, no. June2016, Jun. 2016, doi: 10.3389/FPLS.2016.00815.
- [10] A. Hussain *et al.*, “Responses of wheat (*Triticum aestivum*) plants grown in a Cd contaminated soil to the application of iron oxide nanoparticles,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 173, pp. 156–164, May 2019, doi: 10.1016/J.ECOENV.2019.01.118.
- [11] M. Rizwan *et al.*, “Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat,” *Chemosphere*, vol. 214, pp. 269–277, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.09.120.
- [12] Z. Isik *et al.*, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles derived from water and methanol extract of *Centaurea solstitialis* leaves and tested for antimicrobial activity and dye decolorization capability,” *Environ Res*, vol. 219, p. 115072, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.ENVRES.2022.115072.
- [13] T. Vandhana and A. J. Clement Lourduraj, “Biogenic synthesis of Mn-Ag co-doped FeO (Fe<sub>1-2x</sub>MnxAg<sub>x</sub>) nanoparticles: As an effective disinfectant and anticancer agent,” *Inorg Chem Commun*, vol. 112, p. 107712, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.INOCHE.2019.107712.
- [14] D. Patiño-Ruiz, L. Sánchez-Botero, L. Tejada-Benitez, J. Hinestroza, and A. Herrera, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Cymbopogon citratus* extract and sodium carbonate salt: Nanotoxicological considerations for potential environmental applications,” *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 14, p. 100377, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.ENMM.2020.100377.
- [15] A. Nadeem *et al.*, “Green synthesis and characterization of Fe, Cu and Mg oxide nanoparticles using *Clematis orientalis* leaf extract: Salt concentration modulates physiological and biological properties,” *Mater Chem Phys*, vol. 271, p. 124900, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124900.
- [16] P. Karpagavinayagam and C. Vedhi, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Avicennia marina* flower extract,” *Vacuum*, vol. 160, pp. 286–292, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.VACUUM.2018.11.043.
- [17] W. Muzafar *et al.*, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Melia azedarach* flowers extract and evaluation of their antimicrobial and antioxidant activities,” *J Mol Struct*, vol. 1269, p. 133824, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.MOLSTRUC.2022.133824.
- [18] S. O. Aisida *et al.*, “Synthesis and characterization of iron oxide nanoparticles capped with *Moringa Oleifera*: The mechanisms of formation effects on the optical, structural, magnetic and morphological properties,” *Mater Today Proc*, vol. 36, pp. 214–218, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.03.167.
- [19] M. S. H. Bhuiyan *et al.*, “Green synthesis of iron oxide nanoparticle using *Carica papaya* leaf extract:

- application for photocatalytic degradation of remazol yellow RR dye and antibacterial activity,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04603.
- [20] M. J. H. Dowlath *et al.*, “Comparison of characteristics and biocompatibility of green synthesized iron oxide nanoparticles with chemical synthesized nanoparticles,” *Environ Res*, vol. 201, p. 111585, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ENVRES.2021.111585.
- [21] M. A. Abid and D. A. Kadhim, “Novel comparison of iron oxide nanoparticle preparation by mixing iron chloride with henna leaf extract with and without applied pulsed laser ablation for methylene blue degradation,” *J Environ Chem Eng*, vol. 8, no. 5, p. 104138, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JECE.2020.104138.
- [22] N. Wang, Y. Yang, and G. Yang, “Great blue-shift of luminescence of ZnO nanoparticle array constructed from ZnO quantum dots,” *Nanoscale Res Lett*, vol. 6, no. 1, pp. 1–6, Apr. 2011, doi: 10.1186/1556-276X-6-338/FIGURES/5.
- [23] T. Kaur *et al.*, “Microbe-mediated biofortification for micronutrients: Present status and future challenges,” *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, pp. 1–17, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-820528-0.00002-8.
- [24] A. Nath *et al.*, “Agrochemicals from nanomaterials—Synthesis, mechanisms of biochemical activities and applications,” *Comprehensive Analytical Chemistry*, vol. 84, pp. 263–312, Jan. 2019, doi: 10.1016/BS.COAC.2019.04.004.
- [25] Y. Liu *et al.*, “Influence of foliar application of some nano-fertilizers in growth and yield of potato under drip irrigation,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1294, no. 9, p. 092024, Sep. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1294/9/092024.
- [26] C. H. Lear, “Mg/Ca palaeothermometry: a new window into Cenozoic climate change,” *Geol Soc Spec Publ*, pp. 313–322, 2007, doi: 10.1144/TMS002.14.
- [27] D. S. Auld, “Zinc coordination sphere in biochemical zinc sites,” *BioMetals*, vol. 14, no. 3–4, pp. 271–313, 2001, doi: 10.1023/A:1012976615056/METRICS.
- [28] M. v. Khodakovskaya *et al.*, “Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 108, no. 3, pp. 1028–1033, Jan. 2011, doi: 10.1073/PNAS.1008856108/SUPPL\_FILE/PNAS.1008856108\_SI.PDF.
- [29] E. E. Elemike, I. M. Uzoh, D. C. Onwudiwe, and O. O. Babalola, “The Role of Nanotechnology in the Fortification of Plant Nutrients and Improvement of Crop Production,” *Applied Sciences 2019, Vol. 9, Page 499*, vol. 9, no. 3, p. 499, Feb. 2019, doi: 10.3390/APP9030499.
- [30] K. Jeyasubramanian, U. U. Gopalakrishnan Thoppey, G. S. Hikku, N. Selvakumar, A. Subramania, and K. Krishnamoorthy, “Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles,” *RSC Adv*, vol. 6, no. 19, pp. 15451–15459, Feb. 2016, doi: 10.1039/C5RA23425E.
- [31] N. Joshi, A. Pathak, D. Chandel Upadhyaya, S. B. Naidu Krishna, and C. P. Upadhyay, “Synthesis of biocompatible Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and MnO<sub>2</sub> nanoparticles for enhanced tuberization in potato (*Solanum tuberosum* L.),” *Biocatal Agric Biotechnol*, vol. 39, p. 102258, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.BCAB.2021.102258.
- [32] G. Pandey, “Challenges and future prospects of agrinanotechnology for sustainable agriculture in India,” *Environ Technol Innov*, vol. 11, pp. 299–307, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.ETI.2018.06.012.
- [33] H. M. Fahmy *et al.*, “Review of Green Methods of Iron Nanoparticles Synthesis and Applications,” *Bionanoscience*, vol. 8, no. 2, pp. 491–503, Jun. 2018, doi: 10.1007/S12668-018-0516-5/METRICS.
- [34] H. A. A. Madhoo and M. Z. Faisal, “Effect of the use of micro-nano fertilizers, normal micro fertilizer and Gibberellic acid and their interference in some growth, chemical, medicinal characteristics and yield in fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.),” *Plant Arch*, vol. 20, no. 1, pp. 2765–2777, 2020.
- [35] F. Zulfiqar, M. Navarro, M. Ashraf, N. A. Akram, and S. Munné-Bosch, “Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations,” *Plant Science*, vol. 289, p. 110270, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.PLANTSCI.2019.110270.
- [36] J. Li, P. R. Chang, J. Huang, Y. Wang, H. Yuan, and H. Ren, “Physiological effects of magnetic iron oxide nanoparticles towards watermelon,” *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 13, no. 8, pp. 5561–5567, Aug. 2013, doi: 10.1166/JNN.2013.7533.