

Effect of TiO₂ Nanoparticles Obtained via Green Synthesis on the Germinative Development of Quinoa Seeds

David Asmat-Campos, Dr. ^{1,2*}, Luisa Juárez-Cortijo, MSc.², Daniel Delfín-Narciso, MSc.², Ángel Carreño-Ortega, Dr. ³

¹ Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú

² Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú,

³ Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, Centro de Investigación CIMEDES, Almería, España. *

david.asmat@upn.edu.pe , davidasmat88@hotmail.com

Abstract- The research delves into how the application of TiO₂ nanoparticles, synthesized through a sustainable process, influences the initial growth of quinoa seeds. This study employs detailed statistical analyses and periodic evaluations to closely examine the germinative response of seeds in the presence of these nanoparticles.

The results shed light on the significant role of TiO₂ nanoparticles in the germination process of quinoa, providing a deeper understanding of the underlying mechanisms. The green synthesis used to obtain these nanoparticles adds an eco-friendly component, highlighting the importance of sustainability in nanotechnological research.

This study not only contributes to the understanding of the interaction between nanomaterials and plant development but also has practical implications for sustainable agriculture by providing insights into how nanoparticles could be used to enhance crop yield and resilience. It offers a comprehensive and meaningful insight into the impact of TiO₂ nanoparticles on the germinative development of quinoa seeds.

Keywords - TiO₂ nanoparticles, green synthesis, germination, quinoa, *Chenopodium quinoa*.

Digital Object Identifier:
ISSN, ISBN:
DO NOT REMOVE

Impacto de nanopartículas de TiO₂ obtenidas por síntesis verde en el desarrollo germinativo de semillas de quinoa

David Asmat-Campos, Dr. ^{1,2*}, Luisa Juárez-Cortijo, MSc.², Daniel Delfín-Narciso, MSc.², Ángel Carreño-Ortega, Dr. ³
¹ Universidad Privada del Norte, Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, Trujillo, Perú, ² Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú, ³ Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, Centro de Investigación CIMEDES, Almería, España. * david.asmat@upn.edu.pe, davidasmat88@hotmail.com

Abstract– *La investigación se adentra en cómo la aplicación de las nanopartículas de TiO₂, sintetizadas mediante un proceso sostenible, influyen en el crecimiento inicial de las semillas de quinoa. Este estudio emplea análisis estadísticos detallados y evaluaciones periódicas para examinar de cerca la respuesta germinativa de las semillas ante la presencia de estas nanopartículas.*

Los resultados arrojan luz sobre el importante papel de las nanopartículas de TiO₂ en el proceso germinativo de la quinoa, ofreciendo una comprensión más profunda de los mecanismos subyacentes. La síntesis verde utilizada para obtener estas nanopartículas añade un componente eco-amigable, destacando la importancia de la sostenibilidad en la investigación nanotecnológica.

Este estudio no solo contribuye al conocimiento de la interacción entre nanomateriales y desarrollo vegetal, sino que también tiene implicaciones prácticas para la agricultura sostenible al proporcionar información sobre cómo las nanopartículas podrían ser utilizadas para mejorar el rendimiento y la resistencia de los cultivos, el mismo que ofrece una visión integral y significativa sobre el impacto de las NP TiO₂ en el desarrollo germinativo de las semillas de quinoa.

Keywords- *Nanopartículas de TiO₂, síntesis verde, germinación, quinoa, Chenopodium quinoa.*

I. INTRODUCCIÓN

La *Chenopodium quinoa* es considerada un pseudocereal de origen andino que tiene un alto valor nutricional y muy buena capacidad de adaptación a diferentes condiciones medioambientales. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura lo categoriza como un alimento estratégico para la seguridad mundial alimentaria. [1], [2], [3]. La quinoa contiene aminoácidos esenciales como la lisina, minerales y vitaminas en mayor proporción que los cereales convencionales como son el P, Fe, Ca, K, Mg y compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias como B1, B9, E y C [4], [5], [6].

Otras ventajas de este cultivo es que su valor nutricional destaca tanto en el grano como en sus hojas, ampliando las posibilidades de dar valor agregado a la planta al ser procesada [7]. Estudios determinaron que cada genotipo expresa, de acuerdo a la tolerancia a los ambientes secos y cálidos entre otros factores, su potencial rendimiento y calidad nutricional [8]. Debido a su expansión y promoción a otros continentes los estudios relacionados con la masividad del cultivo de quinoa demandan alternativas de solución a problemas que puedan enfrentar los agricultores ante algunos agentes biológicos como hongos, virus y bacterias.

La nanotecnología es el campo de la ciencia que permite manipular los materiales a nivel nanométrico para conferirle propiedades singulares. El impacto de la nanotecnología es multisectorial en cuanto a aplicabilidad se refiere, áreas como la medicina, la electrónica, diversas industrias y desde luego la agricultura se han visto beneficiadas [9], [10], [11], [12].

En la agricultura podemos encontrar diversas propuestas como son nanofertilizantes capaces de liberar los nutrientes en cantidades controladas; nanopesticidas actuando contra las plagas con un reducido uso de las cantidades evitando contaminar los suelos, el agua y los cultivos [13], [14], [15]. En general la nanotecnología promete proporcionar un aumento del rendimiento y la calidad de los alimentos, reducción de costos, seguridad y reducción del impacto ambiental que genera la actividad agrícola y agroindustrial. Sin embargo, también plantea desafíos como estudios de impacto a largo plazo y riesgos como posibles procesos de toxicidad y/o alergenicidad debido a la presencia de los nanomateriales. Por ello se hace necesario la regulación de su uso y enfoques responsables y éticos de los estudios que consideren beneficios y riesgos.

En general la nanotecnología promete proporcionar un aumento del rendimiento y la calidad de los alimentos, reducción de costos, seguridad y reducción del impacto ambiental que genera la actividad agrícola y agroindustrial. Sin embargo, también plantea desafíos como estudios de impacto a largo plazo y riesgos como posibles procesos de toxicidad y/o alergenicidad

debido a la presencia de los nanomateriales. Por ello se hace necesario la regulación de su uso y enfoques responsables y éticos de los estudios que consideren beneficios y riesgos.

En la actualidad se ha generado una tendencia del uso de extractos elaborados a partir de residuos orgánicos y en especial agroindustriales como los frutos rojos, berries y cítricos, piel de algunos frutos, partes de las plantas como las raíces, o sus hojas, esto debido a la presencia de compuestos fenólicos y compuestos bioactivos como azúcares que cumplen un rol primordial al ser aprovechada su capacidad reductora en la transformación de iones metálicos en partículas nanométricas con propiedades que las hacen compatibles y utilizables en sistemas biológicos [16], [17], [18], [19]. Otra ventaja de usar extractos de residuos para la elaboración de nanomateriales es contribuir a la economía circular y al cuidado del medioambiente, así también se reducen costos y se simplifican los procesos al utilizar sustancias que cumplen la función de agentes reductores y muchas veces de estabilizadores del estado obtenido [20], [21]. En una investigación se obtuvo nanopartículas de Óxido de Titanio (TiO_2) utilizando la cascara de la fruta de la *Annona squamosa L.* La que reportó NP de TiO_2 rutilo, estas se caracterizaron mediante estudios SEM, EDS, TEM, XRD y UV. Los resultados del espectrofotómetro UV-Vis mostraron una producción de NP de TiO_2 con una resonancia de plasmón superficial a 284 nm., en el espectro XRD confirmaron también la formación de las NP de TiO_2 con picos en $2\theta = 27,42^\circ$, $36,10^\circ$, $41,30^\circ$ y $54,33^\circ$. Las imágenes TEM mostraron la polidispersidad de las nanopartículas de formas esféricas y tamaño de 23 ± 2 nm. [22].

De forma similar se informó que el extracto de hoja de *Calotropis gigantea L.* reduce en poco menos de 6 horas el TiO_2 a nanopartículas, este alto potencial de reducción fue atribuido a la presencia del extracto. También se utilizó *Morinda citrifolia L.* con las que se obtuvieron NPs de tamaño promedio de 15nm determinado mediante SEM, los datos espectrales de FTIR mostraron la presencia de antraquinonas y varios compuestos fenólicos que se supone que son reactivos activos para la reducción de NPs de TiCl_4 a TiO_2 . A diferencia de las obtenidas con la *Moringa oleifera Lam* con lo que se obtuvo NPs de 100 nm con variadas estructuras y alto potencial de curación de heridas [23], [24], [25].

La variación en tamaño y morfología observada entre los estudios reportados se debe a la influencia de la temperatura de reacción, el tiempo y la fuente de la planta, estas investigaciones nos permiten establecer parámetros que influyen en el mecanismo de síntesis. Y que actualmente se están explorando para la síntesis de NP de TiO_2 por sus múltiples aplicaciones. En un estudio se evaluó la inoculación de suspensiones de NPs de dióxido de titanio con incorporación de plata ($\text{TiO}_2\text{-Ag}$) en

semillas de espinaca. Las NPs se sintetizaron usando el método sol-gel y se obtuvieron muestras en polvo con tamaños de partícula entre 7 y 26 nm que a diferentes concentraciones se suspendieron en agua para ser inoculadas; respecto al grupo control se obtuvo un mejor crecimiento de las plantas a las tratadas con las NPs de tamaño más pequeño, pero de concentración del 2 % que fue la más alta evaluada en el experimento, la Razón de Evolución de Oxígeno (REO) es similar a la que se observó en las plantas del grupo control. Esto sugiere que el tratamiento con NPs de $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ entre 7 y 8 nm puede favorecer el crecimiento sin alterar la tasa fotosintética de plantas de espinaca a bajas concentraciones, prometiendo ser una alternativa eficiente para mejorar la producción de este cultivo [26].

En el presente artículo se tiene como objetivo mostrar los resultados de evaluar nanomateriales como lo son las NPs de TiO_2 en el rendimiento y la resistencia del proceso de germinación de las semillas de quinoa, la misa que ofrecería una visión significativa en la interacción nanomaterial-vegetal.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Síntesis verde de nanopartículas de TiO_2

Inicialmente se llevó a cabo la obtención de un extracto acuoso a partir de hojas frescas de guanábana (*Annona muricata L.*) para la síntesis de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2 NP). Las hojas, fueron lavadas, escurridas a la sombra y cortadas en trozos pequeños. La extracción se realizó mediante agua destilada en una placa calefactora (984VW7CH, VWR, Lab. USA) durante 15 min con agitación constante. Utilizando una bomba de vacío de diafragma (GAST DOA-P704-AA), se filtró al vacío el extracto acuoso resultante.

Seguidamente, se procedió a la síntesis biogénica de nanopartículas de TiO_2 . Utilizando butóxido de titanio ($\text{Ti}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4$) como precursor y el extracto acuoso de *Annona muricata L.* como agente reductor y estabilizante, se preparó una solución precursora a una concentración de 0.02 g/mL. La mezcla se agitó magnéticamente (Ika Works, C-MAG HS7, Staufen, Alemania) a 500 RPM durante 5 h a temperatura ambiente. Después de la agitación, se retiró la solución, se vertió en crisoles y se sometió a calcinación en mufla (Yamato, FO110CR, CA, USA) durante 2 h. El producto resultante, un polvo blanco, fue molido, lavado tres veces con agua ultrapura y finalmente redisperso. Cabe destacar que todo el experimento se llevó a cabo utilizando agua ultrapura (Thermo Scientific, Barnstead Smart2Pure, MA, EE. UU.)

2. Aplicación de nanopartículas de TiO₂ en semillas de quinoa

Para la aplicación de las NPs de TiO₂ en semillas de *C. quinoa*, se consideraron tres grupos de tratamiento con distinta concentración (v/v) (7.14% (C1), 4.28% (C2) y 1.42% (C3)), más un grupo control; cada grupo con un total de 50 semillas. Las distintas concentraciones se obtuvieron realizando diluciones a partir de la muestra stock de NPs obtenidas previamente. El tratamiento consistió en la aplicación de 2 mL de colide de TiO₂ NP mediante un atomizador a los distintos grupos de semillas las cuales se encontraban sobre dos discos de papel filtro cuantitativo Whatman N° 42 en placas Petri previamente esterilizadas. El grupo control se atomizó con agua en el mismo volumen y condiciones indicadas anteriormente. Los resultados se evaluaron en un periodo total de 60 horas, durante el cual se contabilizó del número de germinados y el tamaño de radícula en periodos de 12 horas.

3. Análisis estadístico

En el análisis estadístico, se empleó el software Microsoft Excel en conjunto con el complemento RealStats. Los datos relativos al porcentaje de germinación fueron sometidos a un diseño ANOVA unifactorial con un nivel de confianza del 95% ($p < 0,05$). La presentación de los resultados del proceso germinativo incluye el promedio estadístico acompañado por su correspondiente desviación estándar.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Nanopartículas de TiO₂ (NP TiO₂)

La Figura 1, muestra los resultados por espectrofotometría UV vis de las nanopartículas de TiO₂, obtenidas mediante el método de síntesis verde. El espectro revela información significativa sobre sus propiedades ópticas. La presencia de dos picos de absorción distintos a 306 nm y 320 nm indica características específicas de tamaño y estructura de estas nanopartículas. El pico de absorción a 306 nm sugiere la existencia de partículas de menor tamaño. Este fenómeno puede atribuirse a la formación de excitones, donde la energía de la luz es absorbida por los electrones y huecos generados en la estructura cristalina de TiO₂. La posición de este pico puede indicar la presencia de partículas más pequeñas, lo que podría tener implicaciones importantes en aplicaciones como la fotocatalisis, donde las propiedades de superficie son cruciales.

Por otro lado, el segundo pico a 320 nm podría sugerir una distribución más amplia de tamaños o incluso la presencia de aglomerados de nanopartículas. Este comportamiento puede estar relacionado con la formación de estructuras cristalinas específicas o variaciones en la morfología de las partículas de

TiO₂ durante el proceso de síntesis. La intensidad relativa de los picos proporciona información sobre la eficiencia de la síntesis verde y la calidad del producto final. Un pico más intenso puede indicar una mayor concentración de nanopartículas o una mayor homogeneidad en el tamaño de las partículas. Este aspecto es crucial para aplicaciones específicas, como en dispositivos optoelectrónicos, donde la uniformidad de las propiedades ópticas es esencial.

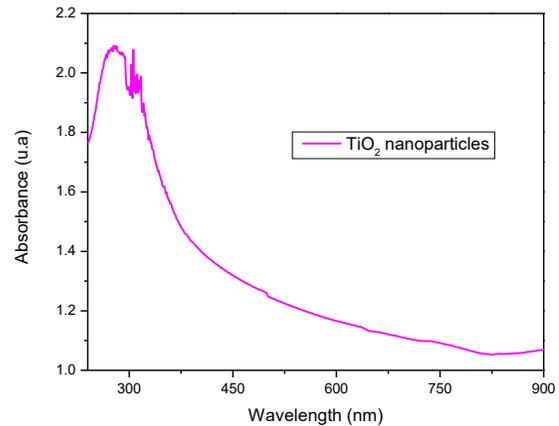


Figura 1. Espectrofotometría UV vis de las NP TiO₂ obtenidas por síntesis verde.

El análisis detallado de las nanopartículas de TiO₂ mediante microscopía electrónica de transmisión (SEM) (Figura 2) ofrece una visión reveladora de su morfología y composición. La observación revela que las nanopartículas exhiben una geometría esférica definida y estructura individual, lo que sugiere una uniformidad notable en su formación durante el proceso de síntesis. La caracterización de tamaño muestra un diámetro promedio de 13.41 ± 1.0 nm, indicando una homogeneidad dimensional en estas nanoestructuras.

El análisis elemental mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS) acoplada a la microscopía electrónica de transmisión (TEM) confirma la presencia significativa de titanio en las nanopartículas. Este resultado respalda la composición esperada de TiO₂ y es esencial para validar la pureza química del material. La relación entre titanio y oxígeno, determinada a través de la espectroscopía EDS, proporciona información valiosa sobre la estequiometría de las nanopartículas, lo que es crucial para comprender y controlar sus propiedades. La uniformidad en la geometría esférica y la estructura individual de las nanopartículas de TiO₂ es esencial para diversas aplicaciones, como la catálisis y la fotocatalisis, donde las propiedades superficiales juegan un papel crucial. Además, el tamaño controlado de las partículas, evidenciado por el análisis de SEM, sugiere un control preciso durante la

síntesis, lo que es prometedor para la reproducibilidad y eficiencia en la aplicación práctica de estas nanoestructuras.

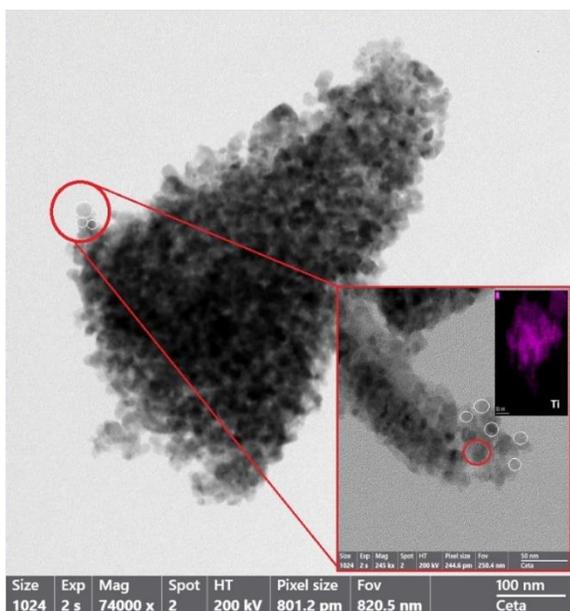


Figura 2. Microscopía electrónica de transmisión y análisis elemental por EDS de las NP TiO₂.

2. Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación mostrado en la Figura 3, corresponde a la evaluación pasadas las 12 primeras horas de iniciado el tratamiento (barras azules) y el final del tratamiento a las 60 horas (barras amarillas), en función de la concentración coloidal de nanopartículas. El periodo de tiempo total fue considerado hasta cuando ya no se presentó el desarrollo radicular. De los resultados, podemos observar que la muestra control mostró un 68% de germinación en las primeras 12 horas y alcanzó el 88% después de 60 horas. Así mismo, la concentración óptima para el tratamiento de semillas es C3, con un valor inicial del 80% y un valor final del 94% de semillas germinadas. Los cálculos estadísticos nos muestran que existen diferencias representativas entre la muestra control y las semillas tratadas bajo las concentraciones C2 y C3 en la etapa inicial. Sin embargo, en la etapa final no es posible indicar diferencia entre el grupo control y los grupos de concentraciones C1 y C2; pero si una diferencia con respecto al grupo de concentración C3. El aumento en la germinación de las semillas debido a las NP de TiO₂ podrían deberse a la capacidad de generar radicales de iones superóxido e hidróxido facilitando la entrada de agua y dióxígeno en las células, acelerando así el metabolismo y la germinación de las semillas [27].

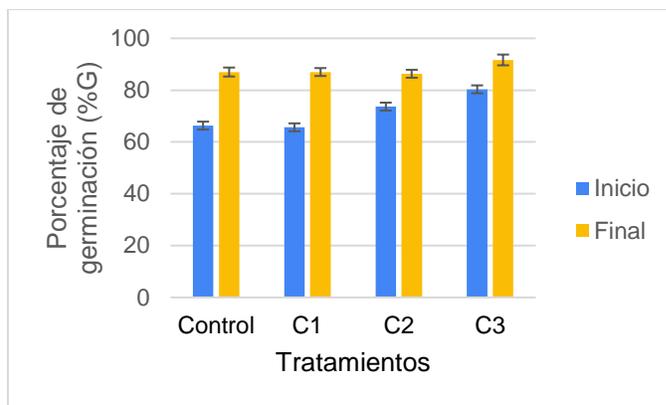


Figura 3. Porcentaje de germinación de semillas de *C. quinoa*.

La evolución de la frecuencia de germinación en función del tiempo (Figura 4) nos muestra la tasa de semillas germinadas en los intervalos de tiempo definidos previamente. Se puede observar que la muestra control presenta un decaimiento del número de semillas germinadas a lo largo del tiempo, mientras que las semillas bajo los tratamientos de nanopartículas de TiO₂ a las distintas concentraciones, poseen un comportamiento interesante al presentar un ligero incremento a las 36 horas de iniciado el proceso. Diversos trabajos confirman también los efectos de las TiO₂ NP sobre tasa de germinación para distintos tipos de semillas [28], [29].

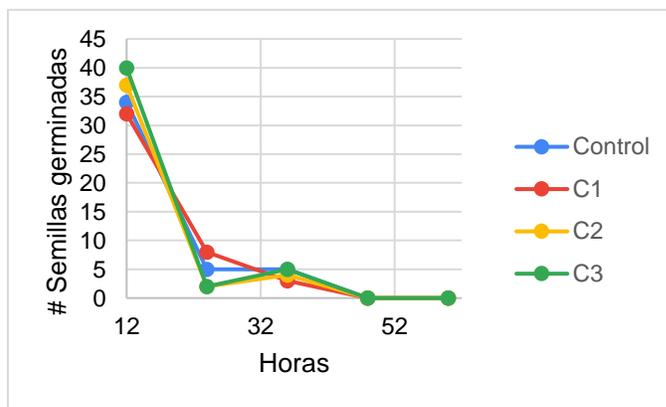


Figura 4. Tasa de germinación.

3. Germinación diaria media (GDM)

Los valores para la GDM (Figura 5) nos muestran la razón entre el porcentaje final de germinación y el número de días transcurridos hasta llegar al valor máximo [30], [31]. Como se observa en la Figura 5, existe una diferencia representativa para este parámetro entre la muestra control y la muestra con tratamiento de concentración C3. Este efecto de los materiales nanométricos sobre la germinación de semillas también es reportado por otros autores donde se indica que en una

concentración adecuada las NP, debido a su tamaño, tienen una mejor capacidad de penetración en la semilla durante el período de tratamiento y potencian el crecimiento [32].

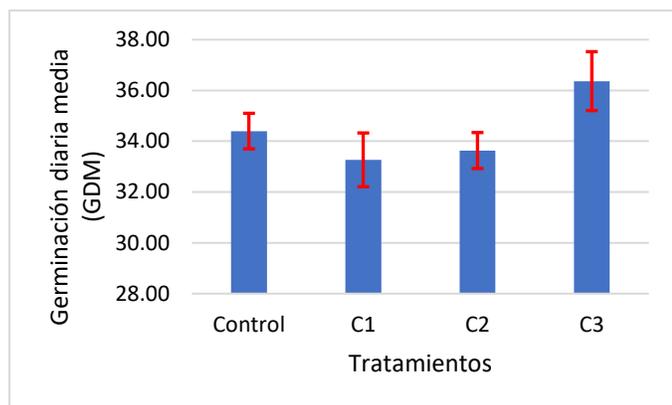


Figura 5. Germinación media diaria.

4. Índice de germinación

Este parámetro proporciona una medida del tiempo de germinación en relación con la capacidad de germinación. Es 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 [33].

La Figura 6, representa el índice de germinación en función a la aplicación de los tratamientos bajo las diferentes concentraciones de nanopartículas de TiO_2 . Es posible observar en estos resultados que la muestra de concentración C3 presentó un mayor IG (0.40) en el primer periodo de 12 horas, seguida de la concentración C2 (0.37) y la muestra control (0.34), mientras que la muestra de concentración C1 fue la que presentó el IG más bajo (0.32). Sin embargo, hacia las 24 horas existe un decaimiento rápido del IG de las muestras C3 y C2, mientras la muestra control y C1, a pesar de también disminuir su IG, sus valores son mayores a las muestras indicadas anteriormente. Hacia las 36 horas de iniciado el proceso la muestra bajo la concentración C3 aumenta notoriamente su valor de IG (0.15) respecto al periodo anterior; valor que también es alcanzado por la muestra control. La muestra C2 también presenta un aumento en su IG, pero en menor proporción, por el contrario, la muestra C1 continúa con el decaimiento de su IG. En los periodos de tiempo finales del proceso (48 y 60 horas) se puede observar que todas las muestras incluido el control no presentan IG. Este comportamiento, sobre la velocidad del proceso de germinación se atribuye a la capacidad de los nanomateriales para penetrar la cubierta de la semilla y activar la diferenciación embrionaria desencadenando las enzimas relacionadas con la descomposición de la latencia de las semillas, mejorando así la velocidad de germinación [34].

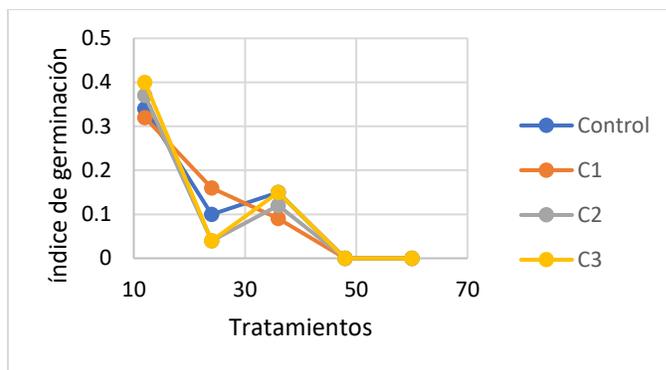


Figura 6. Índice de germinación.

En general, es posible indicar que existe un efecto de la aplicación de nanopartículas sobre la germinación de las semillas. Los nanomateriales a las diferentes concentraciones son capaces de producir nuevos poros en la cubierta de la semilla durante la penetración, lo que promueve el ingreso de los nutrientes hacia el interior de la semilla en germinación, provocando una evolución en la tasa germinación y crecimiento [34].

IV. CONCLUSIONES

La investigación revela una clara influencia de la concentración de coloide de nanopartículas TiO_2 en el proceso de germinación. Es notable que la muestra con la concentración más alta, C3, demuestre un rendimiento significativamente superior en parámetros críticos, como el porcentaje de germinación, germinación diaria media e índice de germinación. Este patrón sugiere una relación dosis-respuesta, indicando que concentraciones más elevadas de nanopartículas TiO_2 pueden tener un impacto positivo en la germinación de las semillas de quinoa. Sin embargo, es crucial considerar cuidadosamente aspectos como la toxicidad potencial y los posibles efectos a largo plazo en el medio ambiente antes de su implementación a gran escala. Estos resultados abren nuevas perspectivas para investigaciones adicionales y aplicaciones prácticas, destacando la importancia de explorar de manera responsable el potencial beneficioso de las nanopartículas en la agricultura sostenible y el desarrollo de cultivos.

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] C. Zou *et al.*, “A high-quality genome assembly of quinoa provides insights into the molecular basis of salt bladder-based salinity tolerance and the exceptional nutritional value,” *Cell Res.* 2017 2711, vol. 27, no. 11, pp. 1327–1340, Oct. 2017, doi: 10.1038/cr.2017.124.
- [2] 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.
- [3] W. T. Pinday, “Efecto de la harina de *Chenopodium quinoa*, del tiempo y la temperatura de fermentación en el volumen de masa fermentada y en la calidad del pan francés,” *Cátedra Villarreal Posgrado*, vol. 2, no. 1, pp. 1–16, Jun. 2023, doi: 10.24039/RCVP2023211673.
- [4] L. Poza-Viejo *et al.*, “Shotgun proteomics of quinoa seeds reveals chitinases enrichment under rainfed conditions,” *Sci. Reports* 2023 131, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-32114-5.
- [5] P. Tessari, A. Lante, and G. Mosca, “Essential amino acids: master regulators of nutrition and environmental footprint?,” *Sci. Reports* 2016 61, vol. 6, no. 1, pp. 1–13, May 2016, doi: 10.1038/srep26074.
- [6] M. Oustani, S. Mehda, M. T. Halilat, and H. Chenchouni, “Yield, growth development and grain characteristics of seven Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in open-field production systems under hot-arid climatic conditions,” *Sci. Reports* 2023 131, vol. 13, no. 1, pp. 1–18, Feb. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29039-4.
- [7] I. Tabatabaei *et al.*, “The diversity of quinoa morphological traits and seed metabolic composition,” *Sci. Data* 2022 91, vol. 9, no. 1, pp. 1–7, Jun. 2022, doi: 10.1038/s41597-022-01399-y.
- [8] G. Abbas *et al.*, “Differential Effect of Heat Stress on Drought and Salt Tolerance Potential of Quinoa Genotypes: A Physiological and Biochemical Investigation,” *Plants* 2023, Vol. 12, Page 774, vol. 12, no. 4, p. 774, Feb. 2023, doi: 10.3390/PLANTS12040774.
- [9] B. Zhang *et al.*, “Diagnosis of Zika virus infection on a nanotechnology platform,” *Nat. Med.* 2017 235, vol. 23, no. 5, pp. 548–550, Mar. 2017, doi: 10.1038/nm.4302.
- [10] S. Ju *et al.*, “Fabrication of fully transparent nanowire transistors for transparent and flexible electronics,” *Nat. Nanotechnol.* 2007 26, vol. 2, no. 6, pp. 378–384, Jun. 2007, doi: 10.1038/nnano.2007.151.
- [11] N. Savage, “Tomorrow’s industries: from OLEDs to nanomaterials,” *Nature*, vol. 576, no. 7786, pp. S20–S22, Dec. 2019, doi: 10.1038/D41586-019-03764-1.
- [12] T. Hofmann *et al.*, “Technology readiness and overcoming barriers to sustainably implement nanotechnology-enabled plant agriculture,” *Nat. Food* 2020 17, vol. 1, no. 7, pp. 416–425, Jul. 2020, doi: 10.1038/s43016-020-0110-1.
- [13] Y. Su *et al.*, “Cost–benefit analysis of nanofertilizers and nanopesticides emphasizes the need to improve the efficiency of nanoformulations for widescale adoption,” *Nat. Food* 2022 312, vol. 3, no. 12, pp. 1020–1030, Dec. 2022, doi: 10.1038/s43016-022-00647-z.
- [14] F. Naseem, Y. Zhi, M. A. Farrukh, F. Hussain, and Z. Yin, “Mesoporous ZnAl₂Si₁₀O₂₄ nanofertilizers enable high yield of *Oryza sativa* L.,” *Sci. Reports* 2020 101, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, Jul. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-67611-4.
- [15] F. J. Carmona *et al.*, “Urea-functionalized amorphous calcium phosphate nanofertilizers: optimizing the synthetic strategy towards environmental sustainability and manufacturing costs,” *Sci. Reports* 2021 111, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-83048-9.
- [16] A. M. Abdel-Aty, A. Z. Barakat, R. I. Bassuiny, and S. A. Mohamed, “Statistical optimization, characterization, antioxidant and antibacterial properties of silver nanoparticle biosynthesized by saw palmetto seed phenolic extract,” *Sci. Reports* 2023 131, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-42675-0.
- [17] S. G. & S. R. Parthasarathi Perumal, Nazeer Ahamed Sathakkathulla, Kalaivani Kumaran, Ramaladevi Ravikumar, Justin Jayaraj Selvaraj, Vijayakumar

- Nagendran, Mariappan Gurusamy, Naazneen Shaik, Senthilkumar Gnanavadeivel Prabhakaran, Vinothkumar Suruli Palanichamy, Vellai, "Green Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Aqueous Extract of Shilajit: Their Characterization and Anticancer Activity," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 2204, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52217-x>.
- [18] N. Ezzat, M. A. Hefnawy, S. S. Medany, R. M. El-Sherif, and S. A. Fadlallah, "Green synthesis of Ag nanoparticle supported on graphene oxide for efficient nitrite sensing in a water sample," *Sci. Reports 2023 131*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, Nov. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-46409-0.
- [19] O. Mohammad *et al.*, "Bio-mediated synthesis of 5-FU based nanoparticles employing orange fruit juice: a novel drug delivery system to treat skin fibrosarcoma in model animals," *Sci. Reports 2019 91*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, Aug. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-48180-7.
- [20] S. F. Hansen *et al.*, "Nanotechnology meets circular economy," *Nat. Nanotechnol. 2022 177*, vol. 17, no. 7, pp. 682–685, Jun. 2022, doi: 10.1038/s41565-022-01157-6.
- [21] A. A. Keller, A. Ehrens, Y. Zheng, and B. Nowack, "Developing trends in nanomaterials and their environmental implications," *Nat. Nanotechnol. 2023 188*, vol. 18, no. 8, pp. 834–837, Jun. 2023, doi: 10.1038/s41565-023-01409-z.
- [22] S. M. Roopan *et al.*, "Efficient phyto-synthesis and structural characterization of rutile TiO₂ nanoparticles using *Annona squamosa* peel extract," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 98, pp. 86–90, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.SAA.2012.08.055.
- [23] E. Tilahun Bekele, B. A. Gonfa, and F. K. Sabir, "Use of Different Natural Products to Control Growth of Titanium Oxide Nanoparticles in Green Solvent Emulsion, Characterization, and Their Photocatalytic Application," *Bioinorg. Chem. Appl.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6626313.
- [24] H. H. Mohamed, "Introduction to green processing for sustainable materials," *Sustain. Mater. Green Process. Energy Convers.*, pp. 1–42, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-822838-8.00004-1.
- [25] E. A. Shalaby, S. M. M. Shanab, W. M. A. El-Raheem, and E. A. Hanafy, "Biological activities and antioxidant potential of different biosynthesized nanoparticles of *Moringa oleifera*," *Sci. Reports 2022 121*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, Nov. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-23164-2.
- [26] F. Gordillo-Delgado, J. Zuluaga-Acosta, and B.-J. Marín-Gallego, "Inoculación de nanopartículas de TiO₂-Ag en semillas de espinaca," *Inf. Técnico*, vol. 83, no. 1, pp. 76–85, Apr. 2019, doi: 10.23850/22565035.1659.
- [27] L. Zheng, F. Hong, S. Lu, and C. Liu, "Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 104, no. 1, pp. 83–91, Apr. 2005, doi: 10.1385/BTER:104:1:083/METRICS.
- [28] M. R. Castiglione, L. Giorgetti, C. Geri, and R. Cremonini, "The effects of nano-TiO₂ on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L.," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 13, no. 6, pp. 2443–2449, Jun. 2011, doi: 10.1007/S11051-010-0135-8/METRICS.
- [29] C. P. Andersen *et al.*, "Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles," *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 35, no. 9, pp. 2223–2229, Sep. 2016, doi: 10.1002/ETC.3374.
- [30] S. F. A. Amin, I. Mansur, P. Pamoengkas, and A. Yusmur, "Germination Test of Two Different Types of Seed to Accelerate Reclamation and Rehabilitation of Ex-limestone Mining Land," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 959, no. 1, p. 012050, Jan. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/959/1/012050.
- [31] M. G. Kulkarni, R. A. Street, and J. Van Staden, "Germination and seedling growth requirements for propagation of *Dioscorea dregeana* (Kunth) Dur. and Schinz — A tuberous medicinal plant," *South African J. Bot.*, vol. 73, no. 1, pp. 131–137, Jan. 2007, doi: 10.1016/J.SAJB.2006.09.002.
- [32] H. Feizi, P. Rezvani Moghaddam, N. Shahtahmassebi, and A. Fotovat, "Impact of bulk and nanosized titanium dioxide (TiO₂) on wheat seed germination and seedling growth," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 146, no. 1, pp. 101–106, Apr. 2012, doi: 10.1007/S12011-011-9222-7/METRICS.
- [33] J. D. Bewley, K. J. Bradford, H. W. M. Hilhorst, and H. Nonogaki, "Germination," *Seeds*, pp. 133–181, 2013, doi: 10.1007/978-1-4614-4693-4_4.
- [34] N. A. Younes, H. S. Hassan, M. F. Elkady, A. M. Hamed, and M. F. A. Dawood, "Impact of synthesized metal oxide nanomaterials on seedlings production of three Solanaceae crops," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03188.