

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



NANOFERTILIZANTES LÍQUIDOS

POR

DAVID ALEXIS HERNÁN MARABOLÍ SANDOVAL

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILE
2023

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

NANOFERTILIZANTES LÍQUIDOS

POR

DAVID ALEXIS HERNÁN MARABOLÍ SANDOVAL

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2023**

Aprobada por:

Profesor Asistente, Anali Rosas G
Ing. Agrónoma, Dra.Cs. Rec. Naturales.

Guía

Profesor Asistente José Cuevas B
Ing. Agrónomo, Mg. Cs. Agronómicas.

Asesor

Profesor Asistente Winfred Espejo C.
Med. Veterinario, Dr. Cs. Ambientales.

Asesor

Profesor Asociado Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.
Mención producción Animal

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	5
Summary.....	5
Introducción.....	6
Desarrollo y Discusión	9
Conclusión.....	23
Referencias.....	24

INDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Resumen de resultados de búsqueda de información acerca de nanofertilizantes en las bases de datos paper review y patentes.....	7
Tabla 2	Formulación y efectos en plantas de los nanofertilizantes líquidos y nivel de desarrollo de la tecnología estudios a nivel de laboratorio, invernadero y campo.....	11

NANOFERTILIZANTES LÍQUIDOS

LIQUID NANOFERTILIZERS

Palabras índice adicionales: Fertilizantes, Nanocompositos, Nanoquitosano - NPK, Formulaciones Nanotecnológicas, nanopartículas biogénicas.

RESUMEN

Los fertilizantes en general tienen baja eficiencia y, en respuesta a esta problemática se está investigando el uso de la nanotecnología para formular los llamados nanofertilizantes, que en su mayoría se presentan en formulaciones líquidas. Las formulaciones de los nanofertilizantes se diseñan para liberación controlada de nutrientes. Entre las principales formulaciones propuestas por los investigadores están: nanopartículas de apatita estabilizadas en una solución de carboximetilcelulosa; nanopartículas de ZnO sintetizadas utilizando acetato de Zinc y ácido oxálico; nanotubos de C o quitosano cargados con NPK (nitrógeno, fósforo y potasio); Si encapsulado en nanomaterial de quitosano; nanofertilizantes biogénicos, que se sintetizan a partir de extractos biológicos en mezcla con nutrientes minerales. Considerando estos antecedentes, el objetivo de esta monografía es analizar la información acerca de las formulaciones de los nanofertilizantes líquidos y sus efectos en la producción vegetal para estimar el nivel de desarrollo en que se encuentra la tecnología. La mayoría de las investigaciones han mostrado una mejora en el desarrollo de las plantas, pero los ensayos se han realizado principalmente a escala de laboratorio, sin haber alcanzado todavía la validación agronómica.

SUMMARY

Fertilizers in general have low efficiency and, in response to this problem, the use of nanotechnology is being investigated to formulate the so-called nanofertilizers, which are mostly presented in liquid formulations. Nanofertilizer formulations are designed for controlled release of nutrients. Among the main formulations proposed

by the researchers are: Apatite nanoparticles stabilized in a carboxymethylcellulose solution; ZnO nanoparticles synthesized using zinc acetate and oxalic acid; carbon nanotubes or chitosan loaded with NPK; Si encapsulated in chitosan nanomaterial; Biogenic nanofertilizers, which are synthesized from biological extracts mixed with mineral nutrients. Considering this background, the objective of this monograph is to analyze the information about the formulations of liquid nanofertilizers and their effects on plant production to estimate the level of development of the technology. Most of the investigations have shown an improvement in the development of the plants, but the tests have been carried out mainly on a laboratory scale, without having yet reached agronomic validation.

INTRODUCCIÓN

En general, el 50 – 70% de los fertilizantes químicos de uso convencional se pierden en el medio ambiente, lo que a su vez causa problemas económicos, agronómicos y ambientales, al igual que puede afectar la salud de las personas. Por lo cual estos problemas obligaron a buscar alternativas más ecológicas, que solucionen los problemas económicos y sean más sustentables. Una de las propuestas son los nanofertilizantes, que han sido diseñados para generar una liberación lenta y controlada de nutrientes (Ghidan *et al.*, 2020).

La nanotecnología se refiere a las diferentes estructuras de la materia con dimensiones del orden de una millonésima parte del metro (Poole y Owens, 2007). La integración de la nanotecnología para desarrollar nuevas formulaciones nanofertilizantes es un tema de creciente interés en los últimos años (Gaubá *et al.*, 2023), y se espera que la aplicación de fertilizantes en forma de nanopartículas genere un crecimiento significativo en la producción agrícola en todo el mundo (Gaubá *et al.*, 2023). Los nanofertilizantes son nanomateriales de tamaño de 1 a 100 nm que suministran al menos uno o más tipos de nutrientes a las plantas (Guo, 2004; Liu y Lal, 2015; Singh, 2017).

Según el método de aplicación de los nanofertilizantes el mercado está segmentado en: aplicación al suelo, aplicación foliar, aplicación a la semilla (Ghosh *et al.*, 2022). Las tendencias internacionales indican que el mercado global de los

nanofertilizantes se está expandiendo a una CAGR (Compound Annual Growth Rate o tasa de crecimiento anual compuesto) muy alta que supera el 17%, pronóstico para el periodo 2022 al 2030 (Precedence Research, 2022). El crecimiento futuro del mercado mundial de los nanofertilizantes y su rápida expansión está respaldado por el aumento en el número de investigaciones científicas en esta área (Precedence Research, 2022). Es así como las bases de datos científicas como Science Direct, Scopus, Scielo y las bases de datos de patentes como Espacenet y Wipo, se muestra un aumento en las publicaciones en los últimos 5 años acerca de nanofertilizantes.

Dadas las tendencias del mercado de los nanofertilizantes es importante conocer el grado de avance que tienen estas tecnologías y, para evaluar la madurez de una tecnología existe un acuerdo internacional generado por la comunidad económica europea. En este acuerdo se consideran 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real. La medida para describir la madurez de una tecnología se denomina TRL, acrónimo que procede del inglés Technology Readiness Level, actualmente es una forma aceptada a nivel internacional y fue incorporada en la implementación del programa Horizonte 2020. Cada nivel caracteriza el progreso en el desarrollo de una tecnología, desde la idea (nivel 1 hasta su despliegue completo en el mercado nivel 9). En cuanto al entorno en el que se desarrolla un proyecto de las tecnologías, en los 4 primeros niveles (TRL1, TRL4) el entorno de validación de tecnologías es en el laboratorio, en los niveles TRL5 y TRL6 la tecnología se estaría validando en un entorno con características similares al entorno real y, los 3 últimos niveles (TRL7-TRL9) abordan las pruebas y validación de la tecnología en un entorno real.

Considerando estos antecedentes, el objetivo de esta monografía es analizar la información acerca de las formulaciones de los nanofertilizantes líquidos y sus efectos en la producción vegetal para estimar el nivel de desarrollo en que se encuentra la tecnología.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Los nanofertilizantes están formulados con nanomateriales, las características y propiedades de los nanomateriales pueden variar producto de la diversidad en los parámetros y diseños utilizados para su síntesis. Existen variados materiales empleados como componentes principales de la matriz, pueden tener polímeros naturales tales como quitosano, dextrano, alginato (Gómez-Gaete, 2014). Estos materiales normalmente se mezclan con nutrientes minerales conformando los llamados nanocompositos, que si incluyen un componente biológico se llaman bionanocompositos. Los nanofertilizantes están formulados por distintos nanocompositos, entre los principales están: nanopartículas de apatita + carboximelcelulosa que se presenta en forma de hidrogel con nanopartículas; nanopartículas de quitosano conformando una membrana polimérica y nanotubos de C con N + P + K; nanofertilizantes de ZnO; Si encapsulado con quitosano.

Una nueva tendencia para la síntesis de nanofertilizantes, es usar extractos de microorganismos o plantas, cuyas biomoléculas permiten producir nanopartículas o nanomateriales, que en el caso de los nanofertilizantes se denominan “biogénicos”. Una de las principales ventajas de estas biosíntesis es lograr procesos de producción más amigables para el medio ambiente que las síntesis químicas tradicionales usadas para la nanotecnología (Patil y Chandrasekaran, 2020).

Considerando que una comprensión crítica del estado actual del uso de la nanotecnología en agricultura implica considerar aspectos relacionados con la viabilidad de la aplicación, la comercialización de las nanoformulaciones y las preocupaciones de los consumidores sobre bioseguridad (Guha *et al.*, 2020), en esta revisión se abordan no solamente los aspectos relacionados con la formulación y evaluación en plantas de los nanofertilizantes líquidos, si no también, se analiza el estado de desarrollo de la tecnología y sus perspectivas futuras. A continuación, se explica cuáles son las exigencias de cada uno de los niveles de desarrollo de las tecnologías (TRL):

Los niveles son los siguientes:

- TRL 1: Idea básica la investigación científica inicial se ha completado y comienza la transición hacia investigación aplicada.

- TRL 2: Se ha formulado el concepto de la tecnología, su aplicación y puesta en práctica. Se perfila el plan de desarrollo. Estudios y pequeños experimentos proporcionan una prueba de concepto. Se identifican potenciales impactos sociales.
- TRL 3: Se realizan estudios a escala de laboratorio para validar físicamente las predicciones de los elementos separados de la tecnología. Se verifica que el concepto funciona como era esperado. Se han identificado cuestiones de ampliación de escala. Inicio de la validación de la idea de la aplicación, del posible producto y/o mercado con stakeholders (partes interesadas ej: proveedores y clientes) relevantes.
- TRL 4: Validación a nivel de componentes en laboratorio. Los componentes básicos están integrados, estableciendo que funcionaran en conjunto conformando un sistema. Una unidad de desarrollo de prototipo ha sido construida en el laboratorio. Se contemplan los diseños preliminares del producto o procesos. Productos tecnológicos patentados o en proceso de solicitud de patentes. Se han desarrollado evaluaciones preliminares de: ciclo de vida y modelos de evaluación económica y social.
- TRL 5: Componentes tecnológicos integrados de manera que la configuración del sistema sea similar a su aplicación final en casi todas sus características. Su operatividad es a nivel de laboratorio, pero con un incremento en la fidelidad del sistema avanzando hacia su aplicación final. Se ha desarrollado el prototipo comercial. Se refina el modelado de los procesos (técnica y económicamente). Se han validado evaluaciones de ciclos de vida y se han identificado los siguientes conceptos: salud y seguridad, limitaciones ambientales, regulatorias y de disponibilidad de recursos.
- TRL 6: Prototipo piloto con diseño detallado y con condiciones de escalamiento que le permitirán a la tecnología llegar a un sistema operativo. Sistema en validación en ambiente con condiciones cercanas a las reales operativas. Los componentes y los procesos se han ampliado para demostrar el potencial industrial se ha modelado el sistema a escala comercial completa. Se ha realizado la demostración de mercado con early adopters: primeros clientes en proporcionar retroalimentación

inicial, también puede ser obtenida esta retroalimentación en comparación con stakeholders.

- TRL 7: Prototipo completo con sistema operativo funcional demostrado en ambiente real. La tecnología funciona escala pre-comercial. Se han identificado las cuestiones de la fabricación y operaciones finales. Evaluación económica y ciclo de vida perfeccionada. Revalidación con stakeholders.
- TRL 8: Validación y certificación completa en un entorno real. Se ha demostrado que la tecnología funciona a nivel comercial a través de una aplicación a gran escala. El plan para la adopción social ha sido terminado y validado. Difusión de resultados.
- TRL 9: Producto completamente desarrollado para producción en serie y comercialización. Transferencia y apropiación de resultados en comunidades objetivo. Se ha logrado los siguientes productos empresariales: empresas de bases tecnológicas, secretos empresariales, regulaciones, normas, reglamentos o legislaciones asociadas a las innovaciones generadas (COLCIENCIAS, 2017).

En las bases de datos científicas, tales como Science direct y Scopus, así como, en las bases de datos de patentes hay gran cantidad de estudios acerca de nanofertilizantes en general y nanofertilizantes líquidos (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de resultados de búsqueda de información acerca de nanofertilizantes en las bases de datos paper review y patentes.

Base de datos	Palabras claves	Cantidad
Science direct	Nanofertilizer	838
	Nanofertilizer and foliar	<u>393</u>
	Nanofertilizer and spray	<u>413</u>
	Nanofertilizer and liquid	<u>387</u>
Scopus	Nanofertilizer	301
	Nanofertilizer and foliar	<u>56</u>
	Nanofertilizer and spray	<u>17</u>
	Nanofertilizer and liquid	<u>10</u>
Scielo	Nanofertilizer	4
	Nanofertilizer and foliar	<u>1</u>

	Nanofertilizer and spray	<u>1</u>
	Nanofertilizer and liquid	<u>0</u>
Wipo	Nanofertilizer	11
	Nanofertilizer and foliar	<u>0</u>
	Nanofertilizer and spray	<u>0</u>
	Nanofertilizer and liquid	<u>1</u>
Espacenet	Nanofertilizer	28
	Nanofertilizer and foliar	<u>13</u>
	Nanofertilizer and spray	<u>17</u>
	Nanofertilizer and liquid	<u>13</u>

Fuente: elaboración propia

Utilizando diferentes motores de búsqueda, Science direct, Scopus y Scielo, Y utilizando la palabra nanofertilizer se encontraron 1143 artículos que hablan de los nanofertilizantes en general y sus diferentes formas de aplicación. Al sumarle a la búsqueda las palabras and foliar la cantidad de resultados de artículos científicos se redujo a 450, la palabra nanofertilizer and foliar se refiere a los artículos científicos cuya forma de aplicación de los nanofertilizantes es a la hoja de la planta. Y al usar las palabras nanofertilizer and spray (aplicación del nanofertilizantes mediante un aerosol) y nanofertilizer and liquid (aplicación en estado líquido del nanofertilizante) para cada búsqueda los resultados de artículos científicos fueron 431 y 397.

Por otro lado, utilizando las plataformas de búsqueda de patentes de Wipo y Espacenet para la palabra nanofertilizer se obtuvo una cantidad de patentes de 39 y posteriormente agregando las palabras and foliar, and spray, and liquid se obtuvieron 13, 17 y 14 resultados de patentes respectivamente.

Respecto de la evaluación de los nanofertilizantes líquidos descritos en literatura, aun cuando existen muchos estudios, tanto para macronutrientes como para micronutrientes, en esta monografía se seleccionaron como ejemplo ensayos que cumplan los siguientes requisitos: Hayan sido evaluados, ya sea, a nivel de laboratorio, invernadero o campo, Que indique claramente cuál es su formulación y cuál es la metodología para formularlos.

Después de aplicar los requisitos antes detallados, se incorporaron a esta monografía un total de 11 estudios científicos los cuales se analizaron en detalle en este trabajo. Fueron ordenados separando las formulaciones por el tipo de síntesis, es decir, síntesis química tradicional y síntesis biogénica de nanofertilizantes líquidos, en la tabla 2 se presentan los principales ejemplos de evaluación del efecto de nanofertilizantes líquidos en plantas y el nivel de desarrollo en que se encuentra cada uno de estos estudios.

Los estudios seleccionados se ordenaron dividiendo los resultados de la búsqueda entre macronutrientes o micronutrientes, posteriormente se agruparon dentro de este orden considerando su escala de desarrollo, es decir: laboratorio, invernadero o campo. A continuación, se describe un ejemplo de cada uno de estos estudios y se discuten los resultados de estas evaluaciones.

Tabla 2. Formulación y efectos en plantas de los nanofertilizantes líquidos y nivel de desarrollo de la tecnología estudios a nivel de laboratorio.

Espece Vegetal	Control	Dosis	Suelo	Formulación	Comparación con control	Investigadores	TRL (Niveles)
Trigo harinero (<i>Triticum aestivum</i>)	ZnO nano químico	No hay datos	-	Extracto de <i>Aloe barbadensis Mill</i> (biogénico): ZnO Nano	Mejora en longitud de raíces y brotes	Singh <i>et al.</i> , (2019)	2
Espinaca (<i>Spinacia oleracea L.</i>)	Control: agua destilada	Para la compañía Nualgi America. Inc. (NF – A) La dosis recomendada es de 1ml por 1 L de agua (Nualgi Nanobiotech, 2019). En cambio, para la compañía Land Green & Technology Co., Ltd (NF-B): no hay datos	Sustrato con compost vegetal (50%), turba (35%) y perlita (15%)	2 nanofertilizantes comerciales: NF – A Nanofertilizante de 12 nutrientes esenciales cargados en nanosílice (Nualgi America, Inc., San Marcos, CA). NF – B Nanofertilizante de nano macro y microelementos para el crecimiento de las plantas. (Land Green & Technology Co., Ltd., Taiwán) (Novaland, 2021)	Las dosis más altas de 100 y 500 tuvieron efectos negativos importantes en las hojas indujeron una reducción en el contenido de clorofila, polifenoles, flavonoles y actividad antioxidante, un aumento en el daño oxidativo y el deterioro de la estructura celular.	Gil-Díaz <i>et al.</i> , (2022)	2

Continuación Tabla 2. Formulación y efectos en plantas de los nanofertilizantes líquidos y nivel de desarrollo de la tecnología estudios a nivel de invernadero.

Especie Vegetal	Control	Dosis	Suelo	Formulación	Comparación con control	Investigadores	TRL (Niveles)
Soja (<i>Glicine max</i>)	Superfosfato triple ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	20 L maceta ⁻¹ *no explica la dosis por kg de suelo ni por hectárea (ha)	Medio de cultivo inerte: 50% de turba y 50% de perlita	Nanohidroxiapatita (P nano) + Carboximetilcelulosa	20 L maceta ⁻¹ el tratamiento nano aumentó los rendimientos: peso seco, altura de la planta respecto a los testigos	Liu y Lal, (2014)	3
	Fertilización completa sin P						
Frijol Francés (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Agua	No hay datos	Suelo arcilloso – arenoso pH: 6,7	Dos tipos de nanofertilizantes Nanoquitosano solo (10%) Nanotubos de C solo (20 $\mu\text{g L}^{-1}$)	En la aplicación foliar: mayor rendimiento de peso seco, peso fresco y altura de la planta	Abdel-Aziz <i>et al.</i> , (2019)	2
Trigo Harinero (<i>Triticum aestivum</i>)	ZnNO ₃ , Fertilizante tradicional	40, 80 y 120 ppm ZnO	Suelo franco arenoso	ZnO biogénico (Sintetizado con extracto de <i>Dalbergia sissoo</i>)	Con 80 ppm aumentó los rendimientos de peso seco, peso de 100 semillas y semillas por espiga.	Sheoran <i>et al.</i> , (2021)	2

Repollo (<i>Brassica oleracea</i>) y Lupino (<i>Lupinus mutabilis</i> Sweet)	Sin nanoparticulas	<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Capitata</i> : ZnO-MnO nanotratamientos de 270 y 540 ppm. <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet: FeO-ZnO nanotratamientos de 270 y 540 ppm.	No hay datos	Nanoparticulas de ZnO con MnO, FeO con ZnO biogénicas sintetizadas con extractos de <i>Vaccinium floribundum</i>	La aplicación por aspersión de nanofertilizantes a 270 ppm indicó una mejora importante en el crecimiento de ambas plantas.	Murgueitio-Herrera <i>et al.</i> , (2022)	2
Frijol Frances (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Testigo: 6 mM NH ₄ NO ₃ , 1,6 mM K ₂ HPO ₄ , 0,3 mM K ₂ SO ₄	Nano K (producto comercial de PHC® Nano K): 0, 50, 100, 200 ppm	Medio inerte de vermiculita y perlita 2:1	Nanofertilizante K	Las diferentes dosis de nanofertilizantes de k no presentaron diferencias significativas con el control.	Márquez-Prieto <i>et al.</i> , (2022)	3

Continuación Tabla 2. Formulación y efectos en plantas de los nanofertilizantes líquidos y nivel de desarrollo de la tecnología

estudios a nivel de campo.

Espece Vegetal	Control	Dosis	Suelo	Formulación	Comparación con control	Investigadores	TRL (Niveles)
Papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	Fertilizante tradicional NPK. Dosis recomendada : N: 350 kg ha ⁻¹ , P: 85 kg ha ⁻¹ , K: 200 kg ha ⁻¹	Aplicación foliar de nanofertilizante NPK: a la mitad del nivel recomendado	Suelo arcilloso pH: 7,7	Fertilizantes individuales nano-N, nano-P y nano-K (Empresa privada de Pratishta)	El tratamiento nano aumentó el rendimiento fresco del tubérculo.	Abd El-Azeim <i>et al.</i> , (2020)	5
Mijo cola de zorro (<i>Setaria italica</i> L.)	Control sin Zn	No hay datos	Suelo franco limoso pH: 7,0	Nanopartículas de ZnO	Aumento en el contenido de proteínas y contenido de aceite.	Kolenčík <i>et al.</i> , (2019)	3
Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	Quitosano a granel disueltos en ácido acético SiO ₂ disuelto en hidróxido de sodio	No hay datos expresados en kg ha ⁻¹	Suelo arcilloso pH: 8,2	Nanofertilizante de quitosano – Si 0,08%	Un rendimiento de grano de 43,4% mayor kg parcela ⁻¹	Kumaraswamy <i>et al.</i> , (2021)	3

Frijol Francés (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Control sin fertilizante	No hay datos expresados en kg ha^{-1} . Solo se indica que se aplicaron en concentraciones de 0,10, 20, 30 y 40 mg por litro en aplicación foliar	Suelo arcilloso	Nanopartículas de micronutrientes (ZnO , MnO_2 y MoO_3)	La concentración de 40 mg por litro nanos mejoró significativamente los caracteres de crecimiento vegetativo, el número de flores/planta y el rendimiento.	Salama <i>et al.</i> , (2022)	3
--	--------------------------	--	-----------------	--	--	-------------------------------	---

Fuente: elaboración propia

1. Evaluación de nanofertilizantes líquidos a nivel de laboratorio

1.1 Evaluación del efecto de nanopartículas de óxido de zinc obtenido por “síntesis verde” sobre el desarrollo de *Triticum aestivum* L.

Se evaluaron las distintas concentraciones de nanopartículas de ZnO para la emergencia y germinación de plántulas de trigo con dosis variables de nanofertilizante: 0, 15, 62, 125, 250 y 500 mg L⁻¹. Las semillas tratadas con nanopartículas de ZnO verdes crecieron mejor que las semillas de control (nanopartículas ZnO de 48 nm obtenidas por síntesis tradicional) (Singh *et al.*,2019). Sin embargo, este es un ensayo en que se evaluó solamente la germinación de semillas, el largo de la raíz, el largo de la parte aérea después de 4 días de germinación (Singh *et al.*,2019).

En este ensayo la forma de producción de las nanopartículas fue a través de la síntesis verde. Este tipo de síntesis consiste en la elaboración de nanofertilizantes utilizando material biológico como pueden ser: extracto de partes de plantas, partes de hongos y inóculo bacteriano (Patil y Chandrasekaran, 2020). La síntesis verde de nanopartículas, que utilizan material biológico natural como microorganismos o extracto fermentados, emerge como una alternativa ecológica (Thamilarasan *et al.*, 2018; Chandran *et al.*, 2016; Mazumdar y Haloi, 2011). En general las síntesis de nanopartículas verdes eliminan la necesidad de utilizar agentes reactivos tóxicos que tiene un efecto negativo en el organismo (Gottimukkala *et al.*, 2017; Hoseinpour y Ghaemi, 2018).

Si bien el ensayo está realizado a escala de laboratorio lo cual implica que la producción de nanopartículas es costosa debido a los procesos de extracción, materiales utilizados como el papel Whatman número 1 y en general materiales de alto valor, queda pendiente realizar investigación aplicada para llevar esta metodología innovadora a una mayor escala. Al igual que se debe considerar que las materias primas estén disponibles en grandes cantidades para suplir los requerimientos de fertilizantes de la agricultura. Debido a lo anteriormente mencionado esta investigación se encuentra en el nivel 2 de TRL, ya que identifica potenciales impactos (síntesis verde) sociales de la tecnología y se han realizado estudios de pequeños experimentos que proporcionan una prueba de concepto. El

mérito de esta investigación se reconoce ya que hay poca información sobre nanofertilizante líquidos y aún menos de los nanofertilizantes de síntesis verde.

1.2 Evaluación de la respuesta de plantas de *Spinacia oleracea L.* a diferentes dosis de dos nanofertilizantes comerciales.

El objetivo de este estudio fue realizar una evaluación de dos fertilizantes comerciales. Con diferentes dosis cada uno. Nualgi America, Inc fertilizante con Mezcla de 12 nutrientes esenciales cargados en nano-sílice y Novaland nano que contiene una fórmula única de nano macro y microelementos (Gil-Díaz *et al.*, 2022).

El problema de esta publicación es que indica que “las dosis se calcularon según la dosis recomendada (DR) por el fabricante”, pero no es posible encontrar las dosis en la publicación. Al recurrir a la página web de la empresa Nualgui solo indica la dosis de 1 ml en 1 litro de agua (Nualgi Nanobiotech, 2019), pero no la dosis de nutriente por ha. Por otra parte, la otra empresa mencionada Novaland no publica la dosis en su página web. Como se indica en la Tabla 2 los tratamientos se compararon con control en que se utilizó agua destilada y los resultados son aún muy preliminares mostrando un daño sobre las plantas. Considerando estos antecedentes la tecnología de las empresas Nualgui y Novaland se encuentran en un nivel de TRL 2.

2. Evaluación de nanofertilizantes líquidos a nivel de invernadero

2.1 Efecto de la nanohidroxipatita sobre *Glycine max*

Estos investigadores Liu y Lal, (2014) evaluaron el efecto de un nanofertilizante formulado con nanopartículas de apatita (aporta P) mezcladas con una solución de carboximetilcelulosa.

De acuerdo a lo indicado por los autores, el tratamiento de Nanohidroxipatita tuvo un mejor resultado debido a que es probable que el tiempo de retención del P contenido en la Nanohidroxipatita es más prolongado en el medio poroso que el tratamiento de P tradicional. Por lo tanto, el tratamiento nano suministró más P. Los autores indican que esto podría deberse a que el P tradicional, que es soluble, podría lixiviarse de la columna de sustrato (50% de perlita y 50% de turba) más rápido que la solución de Nanohidroxipatita, porque esta última contiene carboximetilcelulosa, lo que le concede la propiedad viscosa, asegurando la

disponibilidad de P en el medio de crecimiento de las plantas. Es importante mencionar que el estudio anterior no presenta análisis estadísticos, por lo tanto, no se puede asegurar que haya diferencias significativas entre los tratamientos. Dado que en este estudio no se utilizó suelo corresponde a una prueba de concepto de la tecnología por lo tanto está en un nivel 2 de TRL.

2.2 Efecto de diferentes formulaciones con nanoquitosano ó nanotubos de C con NPK sobre *Phaseolus vulgaris* en ensayos en invernadero

A continuación, se muestra un estudio realizado por Abdel - Aziz *et al.*, (2019), que consistió en evaluar las formulaciones de nanoquitosano o nanotubos de carbono (C) solos o cargados con NPK, aplicados de forma foliar o mediante el peletizado de semillas sobre la especie vegetal del frijol francés.

Los valores más altos de parámetros de desarrollo de las plantas se alcanzaron con el Nanoquitosano y los nanotubos de C, aplicado vía foliar. Específicamente, el nanoquitosano generó el doble de rendimiento que el control (agua). Esto se puede deber a que los nanomateriales, tanto el nanoquitosano como el nanotubo de C, generaron un aumento en la división celular con el consiguiente un aumento en el desarrollo de la planta (Khodakovskaya *et al.*, 2012). Dado que el suelo donde se hizo el estudio tenía un muy alto contenido de P ($38,8 \text{ mg kg}^{-1}$), considerando que la mayoría de las especies agronómicas se desarrolla bien con 20 mg kg^{-1} de P, es probable que esto haya contribuido a que los nanomateriales solos produjeran la más alta acumulación de materia seca.

Los tratamientos de nanomateriales cargados con NPK presentaron mayores rendimientos que el control (agua). De acuerdo con los investigadores, esto se puede deber a que la aplicación foliar produce un ingreso más eficiente del fertilizante a través de los estomas y a que al nanoquitosano que produce una mejora en la disponibilidad de los nutrientes y esto a su vez una mejor interacción con las vías fotosintéticas lo que mejora el desarrollo (Van *et al.*, 2013).

Aunque se esperaba que con los nanomateriales cargados con NPK se obtuvieran mejores rendimientos que los nanomateriales solos, esto no ocurrió y los investigadores no explican este resultado. Tampoco se mostró el contenido de N disponible en el suelo. Es necesario aclarar que en este estudio se utilizó como

control solamente agua, por lo que las plantas de este tratamiento no recibieron ningún aporte de nutrientes, y no hay un testigo con fertilización tradicional.

Respecto a las plantas tratadas con nanofertilizantes peletizados sobre semillas, tuvieron muy mal rendimiento ya sea materia seca y altura, tal que incluso pesaron menos que las plantas control. Los autores afirman que los malos rendimientos de los tratamientos de peletizado de semillas podrían atribuirse a los efectos citotóxicos del nanomaterial aplicados a las semillas. Es importante señalar que tampoco se hizo una prueba de germinación preliminar con los nanomateriales para saber si tenían efectos fitotóxicos, lo cual es importante sobre todo si se van a peletizar semillas. Considerando que el estudio no es claro respecto de la dosis de nanofertilizante (expresado como nutrientes NPK) por ha y, considerando que para la síntesis de los nanomateriales se usan reactivos y procesos de laboratorio, esta tecnología se encuentra en un nivel 2 de TRL.

2.3 Mejora del crecimiento y el rendimiento, en *Triticum aestivum* utilizando nanofertilizante biogénico de óxido de zinc sintetizado

En un estudio realizado por Sheoran *et al.*, (2021) se desarrolló una formulación que los investigadores denominan como nanofertilizante biogénico, que consiste en un nanofertilizante de ZnO que es producido utilizando extracto de hojas frescas de *Dalbergia sissoo*, con el cual obtuvieron nanopartículas de alrededor de 30 nm (Grewal *et al.*, 2021). Estos investigadores realizaron un ensayo que consistió en evaluar si había un incremento en el crecimiento y rendimiento, en el cultivo de trigo harinero variedad HD – 2967, utilizando este nanofertilizante. Los investigadores no muestran un análisis químico de suelo y por lo tanto no se sabe el aporte de Zn que estaba realizando el suelo.

Los mejores rendimientos se obtuvieron de los tratamientos de nano óxido de zinc. Como dato de referencia, Banga *et al.*, (2017) afirman que un trigo variedad HD – 2967 puede tener un peso por cada 100 semillas de 4,2 g, por lo tanto, el nanofertilizante a dosis de 80 ppm (4,1 g) fue el único que generó un rendimiento del trigo, competitivo a nivel comercial.

De acuerdo a lo que señalan los investigadores, la aplicación foliar de estos fertilizantes es más eficiente, ya que genera en la parte aérea una mejor absorción

de las nanopartículas en las hojas, debido a su tamaño nanométrico en comparación con los tratamientos tradicionales (Sheoran *et al.*, 2021). Además, se espera que el nano Zn se mueva de una forma más rápida dentro de la planta al ser adsorbido directamente por las estomas, en cambio en el tratamiento de ZnNO₃ tradicional se aplicó en forma granular, directo al suelo, por lo cual su absorción es más lenta ya que se debe esperar que el fertilizante entre en contacto con las raíces de la planta (Corredor *et al.*, 2009; Dietz y Hearth, 2011).

Es necesario destacar que este es un estudio preliminar, realizado a escala de invernadero, y dado a que no hay suficientes datos, no es posible calcular las dosis por ha o por kilo de semilla del nanofertilizante aplicado. Tampoco se indican las dosis aplicadas de fertilizante tradicional ZnNO₃ y no se muestra un análisis químico de suelo con el contenido de Zn inicial, lo cual es fundamental para asegurar que las conclusiones que estos autores obtuvieron son válidas. El nivel de desarrollo de esta tecnología corresponde a 2 debido principalmente a que el proceso de producción del nanofertilizante se encuentra todavía a escala muy preliminar de laboratorio es decir no se han considerado cuestiones de ampliación de escala, pero sí se están considerando los potenciales impactos sociales ya que se trabaja con un proceso de síntesis que es amigable con el medio ambiente.

2.4 Nanofertilizantes de hierro, zinc y manganeso producidos por síntesis verde y su efecto en el crecimiento de *Brassica Oleracea var capitata* y *Lupinus Mutabilis sweet*

En el estudio realizado por Murgueitio-Herrera *et al.*, (2022) se realizó un proceso de biosíntesis de nanofertilizantes, formulación ZnO-MnO y FeO-ZnO, a nivel de laboratorio usando una especie nativa denominada *Vaccinium floribundum*. Como se indica en la tabla 1 este estudio no muestra dosis agronómica (kg de micronutriente por ha) ya que se encuentra a nivel de laboratorio. Las dosis más bajas de este nanofertilizantes mejoraron el desarrollo de la planta lo que indica su potencial agronómico positivo. También sea considerado su potencial impacto social debido al uso de tecnologías de síntesis verde. Sin embargo, se clasifica en un nivel de 2 de TRL debido a que no se ha iniciado la validación de su ampliación a mayores escalas, ya que se utiliza una especie vegetal nativa para obtener los

extractos para la síntesis.

2.5 Efecto de la aplicación foliar de un nanofertilizante comercial de potasio sobre el desarrollo de *Phaseolus Vulgaris*

Una tecnología nanofertilizante evaluada por Marquez-Prieto *et al.*, (2022) sobre la especie *Phaseolus Vulgaris* consiste en un producto comercial denominado PHC[®] Nano K, que fue comparada con soluciones nutritivas comerciales de laboratorio, muestra que esta formulación nanofertilizante no tiene efectos significativos en el crecimiento de las plantas. Además, investigando en la página web de la empresa que produce el nanofertilizante denominada Plant Health Care y en empresas distribuidoras se puede observar que el producto no está disponible (Plant Health Care, 2022). Este estudio se puede clasificar en un nivel 3 de TRL, si bien es un ensayo a nivel de invernadero, se dio inicio a la validación del posible producto tanto a nivel técnico, es decir se investigó su potencial agronómico por parte de una entidad especializada (universidad) y se promociono una página web comercial para validar su potencial mercado con Stakeholders.

3. Evaluación de nanofertilizantes líquidos a nivel de campo

3.1 Formulaciones líquidas de fertilizantes individuales nano-N, nano-P y nano-K sobre *Solanum tuberosum*

En un estudio realizado por Abd El-Azeim *et al.*, (2020) se evaluó el efecto de una mezcla de NPK en formulación nanofertilizante de la compañía privada de India Pratishta sobre la producción de *Solanum tuberosum*. Tal como se señala en la tabla 2 se demostró que, en comparación con los tratamientos control las parcelas que recibieron la aplicación foliar de nanofertilizante NPK al 50% del nivel recomendado mostraron valores más altos de rendimiento económico. A demás de una mejor calidad del tubérculo.

Dado que esta tecnología se encuentra como un producto comercial actualmente disponible en el mercado y que ha sido evaluado por entidades independientes (universidad y Consejo Indio de Investigación Agrícola), que ha superado las limitaciones regulatorias, de disponibilidad de recursos y se ha validado en un entorno pertinente, y el prototipo comercial se encuentra desarrollado, alcanza un nivel 5 de TRL (Ayyappan y Dar, 2014).

3.2 Efecto de la aplicación de aspersión foliar de nanopartículas de óxido de zinc sobre los parámetros cuantitativos, nutricionales y fisiológicos del mijo cola de zorro (*Setaria italica L.*) en condiciones de campo

Los nanofertilizantes además de tener buenos resultados en parámetros de rendimientos, también se han encontrado en algunos estudios que mejoran los parámetros nutricionales y fisiológicos de las plantas, como por ejemplo se puede nombrar a Kolencík *et al.*, (2019), que en su estudio afirma que las plantas de *Setaria italica L.* tratadas con nanofertilizantes de ZnO pueden tener buenos resultados en lo referido contenido de aceite y proteína. Esta tecnología se puede clasificar en el nivel 2 de TRL ya que las nanopartículas que conforman el nanofertilizante son adquiridas de la compañía Sigma-Aldrich, proveedora de reactivos de laboratorio. Por lo tanto, el costo y la ampliación de escalas no han sido considerados. Sin embargo, como el nanofertilizante se evalúa en campo proporciona una prueba de concepto de la tecnología.

3.3 Efecto de un Nanofertilizante de silicio formulado con quitosano sobre el rendimiento de las plantas en *Zea mays L.*

Actualmente el Silicio (Si) ya es considerado como fertilizantes en algunos países como Estados Unidos, Japón y Brasil. En Chile en el año 2022 el SAG autorizó su uso como fertilizante. Entre las nuevas formulaciones de nanofertilizantes también se ha considerado el uso del Si. Por ejemplo, en un estudio realizado por Kumaraswamy *et al.*, (2021) se desarrolló una formulación de Si encapsulado en quitosano, con el objetivo de desarrollar un nanofertilizante de liberación lenta. El ensayo se realizó en parcela de 3,6 m² durante una temporada en la especie vegetal del maíz.

Si bien, en este estudio los autores concluyen que la mejor dosis es 0,08%, parece haber algunos problemas en el diseño experimental del ensayo. Por ejemplo, tal como ellos mismos señalan se utilizó como testigo quitosano al 0,01% pero disuelto en ácido acético a una concentración mucho más alta, específicamente 0,1%, y el otro testigo es SiO₂ al 0,01% pero disuelto en una concentración de 0,1% NaOH, lo que implica que esta solución testigo contiene sustancias en concentraciones que podrían estar afectando el desarrollo de las plantas y, no se

sabe, si pudieron influenciar los resultados de los tratamientos. Por otra parte, es necesario aclarar que los investigadores no muestran un análisis químico del suelo que identifique el contenido de Si total y/o disponible. Todos estos antecedentes generan un cuestionamiento acerca de las conclusiones que los autores obtuvieron. Por otra parte, hubiese sido muy recomendable utilizar como testigo SiO_2 y quitosanos comerciales. Esta tecnología se clasifica en un nivel 2 de TRL debido a que para producir el nanofertilizante se utilizan reactivos y procesos preliminares. Aun cuando la evaluación de la tecnología se realiza en experimentos a nivel de campo los testigos utilizados podrían carecer de validez agronómica (SiO_2 ó NaOH), por lo tanto, no se ha desarrollado la validación del producto considerando cuestiones de ampliación de escala.

3.4 Estudio de nanopartícula de ZnO, MnO y MoO₃ en aplicación foliar sobre desarrollo de *Phaseolus Vulgaris*

Como se indica en la tabla 2 la evaluación de tres micronutrientes en formulación nanofertilizante, esto es Zn, Mn y Mo se evaluaron en concentraciones de 0 a 40 mg litro^{-1} en aplicación foliar (Salama *et al.*, 2022). Para la preparación de los nanofertilizantes se utilizaron reactivos y procesos de laboratorio por lo que la síntesis se encuentra en una escala preliminar de desarrollo aunque el estudio se realizó en campo y se obtuvo un mayor desarrollo de planta con alguno de los tratamientos nanos, esta tecnología se clasifica en nivel 2 de TRL dado que no se han considerado cuestiones de ampliación de escala para la producción de los nanofertilizantes y, tampoco se ha iniciado la validación del posible producto y/o mercado con stakeholders relevantes.

4. Principales recomendaciones

Como recomendación para futuras investigaciones de evaluación de nanofertilizantes es recomendable superar las debilidades expuestas en esta monografía acerca de los estudios tanto a nivel de laboratorio invernadero o campo. En particular, se debe incorporar testigos con plantas tratadas con una nutrición base (no solamente control sin fertilización), de preferencia con fertilizantes tradicionales; incluir el análisis químico de suelo de modo de poder deducir su aporte de nutrientes; que los diseños experimentales incluyan suficientes datos para

calcular las dosis por ha, de modo de poder analizar la viabilidad económica futura. Respecto de la escalabilidad de las innovaciones en nanofertilizantes se debe considerar que las materias primas estén disponibles en grandes cantidades para suplir los requerimientos de fertilizantes de la agricultura, se debe considerar también el costo de estas materias primas y el costo del proceso de producción.

CONCLUSIONES

Las formulaciones de los nanofertilizantes líquidos consisten en el uso de nanomateriales como nanoquitosano, nanotubos de C, nanohidroxapatita mezclados con macro o micronutrientes. Se suma a esto, los nanofertilizante biogénicos que son producidos por biosíntesis con extractos biológicos. El nivel de desarrollo de las mayorías de las formulaciones esta todavía a escala de investigación.

Respecto de los efectos los nanofertilizantes en la producción vegetal, la mayoría de los estudios son a escala de laboratorio y aunque muestran un aumento de desarrollo en las plantas, falta la validación agronómica.

REFERENCIAS

1. Abd El-Azeim, M. M. A., M.S. Sherif. M.S. Hussien. I.A.A. y Tantawy. S.O.Bashandy. 2020. Impacts of nano- and non-nanofertilizers on potato quality and productivity. *Acta Ecologica Sinica*. 40 (5): 388 – 397.
2. Abdel - Aziz, H. M., M.N. Hasaneen. y A.M. Omer. 2019. Impact of engineered nanomaterials either alone or loaded with NPK on growth and productivity of French bean plants: Seed priming vs foliar application. *S. Afr. J. Bot.* 125, 102-108.
3. Ayyappan, S., W. Dar. 2014. Insumos agrícolas 4G basados en nanonutrientes de Prathista y el Consejo Indio de Investigación Agrícola. [en línea]. Prathista. <<https://icar.org.in/node/5915>>. [Consulta: 16 de Julio 2023].
4. Banga, A., A. Yadava.. V.K. Sah. 2017. Growth and Productivity of Wheat (*Triticum aestivum*) Varieties Under Different Poplar (*Populus deltoides* Bartr.) Clones in Tarai Region of Uttarakhand. *J. Tree Sci.* 36(2): 1-7.
5. Chandran, M., D. Yuvaraj. L. Christudhas. K. Ramesh. 2016. Bio-synthesis of iron nanoparticles using the Brown seaweed, *Dictyota dicotoma*. *Biotechnol. An Indian J.* 12 (12):5 - 9.
6. Corredor, E., P.S. Testillano. M.J. Coronado. P. Gonzalez-Melendi. R. Fernandez -Pacheco. C. Marquina. M.R. Ibarra. J.M. Fuente. D. Rubiales. A. Perez de Luque. M.C. Risueño. 2009. Nanoparticle penetration and transport in living pumpkin plants: in situ subcellular identification. *BMC Plant Biol.* 9(1): 1-11.
7. COLCIENCIAS. 2017. 2ª Convocatoria Ecosistema Científico Para La Financiación De Programas De I+D+I Que Contribuyan Al Mejoramiento De La Calidad De Las Instituciones De Educación Superior Colombianas -2017-. [en línea]. Colombia científica. <<https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo-13-niveles-madurez-tecnologica-conv.pdf>>. [Consulta: 17 de julio del 2023].
8. Dietz, K. J., S. Heart. 2011. Plant nanotoxicology. *Trends Plant Sci.* 16(11): 582-589.
9. Gauba, A. S. Kumar–Hari. V. Ramamoorthy. S. Vellasamy. G. Govindan. M. Valan-Arsu. 2023. The versatility of green synthesized zinc oxide nanoparticles in sustainable agriculture: A review on metal-microbe interaction that rewards agriculture. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 125: 1-17.

10. Ghidan, A.Y., A.M.S. Kahlel. T.M. Al - Antary. y H.M. Asoufi. 2020. Efficacy of nanotechnology liquid fertilizers on weight and chlorophyll of broad bean (*Vicia Faba L.*). Fresen Environ. Bull. 29(6): 4789-4793.
11. Ghosh, S., B. Sarkar. A. Kumar. S. Thongmee. 2022. Regulatory affairs, commercialization, and economic aspects of nanomaterials used for agriculture. Nat. Nanotechnol. 479 – 502.
12. Gil-Díaz, M., P. García-Gonzalo. C. Mancho. L.E. Hernández. J. Alonso. M.C. Lobo. 2022. Response of spinach plants to different doses of two commercial nanofertilizers. Sci. Hortic. 301: 1 – 15.
13. Gómez-Gaete, C., 2014. Nanoparticulas Polimericas: Tecnologia y Aplicaciones Farmaceuticas (Polymeric nanoparticles: technologie and pharmaceutical applications). Rev. Farmacol. Chile, 7(2):7-16.
14. Gottimukkala, K., R.P. Harika. Z. Deevaka. 2017. Green synthesis of iron nanoparticles using green tea leaves extract. J. Nanomed. Biother. Discov. 7(1):1-4.
15. Grewal, S., S. Kumari. S. Goel. 2021. In Vitro Antifungal and Antibacterial Effects of Biosynthesized Zinc Oxide Nanoparticles Against Selected Pathogenic and Non-Pathogenic Strains. J Nanosci Nanotechnol. 21(6): 3539-3546.
16. Guha, T., G. Gopal. R. Kundu. A. Mukherjee. 2020. Nanocomposites for Delivering Agrochemicals: A Comprehensive Review. J. Agric. Food Chem. 68(12): 3691 - 3702.
17. Guo, L.J., 2004. Recent progress in nanoimprint technology and its applications. J Phys D Appl Phys. 37(11): 1694-1714.
18. Hoseinpour, V., N. Ghaemi. 2018. Green synthesis of manganese nanoparticles: applications and future perspective—A review. 189: 234 – 243.
19. Khodakovskaya, M. V., K. de Silva. A. S. Biris. E. Dervishi. H. Villagarcia. 2012. Carbon Nanotubes Induce Growth Enhancement of Tobacco Cells. ACS Nano. 6(3): 2128-2135.
20. Kolencík, M., D. Ernst. M. Komár. M. Urík. M. Šebesta. E. Dobroc̣ka. I. C̣erný. R. Illa. R. Kanike. Y. Qian. H. Feng. D. Orlová. G. Kratošová. 2019. Efect of

Foliar Spray Application of Zinc Oxide Nanoparticles on Quantitative, Nutritional and Physiological Parameters of Foxtail Millet (*Setaria italica* L.) under Field Conditions. *Nanomaterials*. 9(11):1559.

21. Kumaraswamy, R.V., V. Saharan. S. Kumari. R. Chandra. A. Pal. S. Sundar. S. Rakshit. R.Raliya. P. Biswas. 2021. Chitosan-silicon nanofertilizer to enhance plant growth and yield in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiol. Biochem.* 159, 53 - 66.
22. Liu, R. y R. Lal. 2014. Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Sci Rep.* 4(5686).
23. Liu, R., R. Lal. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci of the Tot Env.* 514, 131-139.
24. Márquez-Prieto, A.K., A. Palcio-Márquez. E. Sánchez. B.C. Macias-López. S. Pérez-Álvarez. O. Villalobos-Cano. P. Preciado-Rangel. 2022. Impact of the foliar application of potassium nanofertilizer on biomass, yield, nitrogen assimilation and photosynthetic activity in green beans. *Not Bot Horti Agrobot Cluj Napoca.* 50(1):1 -12.
25. Mazumdar, M., N. Haloi. 2011. A study on Biosynthesis of Iron nanoparticles by *Pleurotus sp.* *J. Microbiol. Biotechnol. Res.* 1: 39 – 49.
26. Murgueitio-Herrera, E., C. E. Falconi. L. Cumbal. J. Gómez. K. Yanchatipán. A. Tapia. K. Martínez. I. Sinde-Gonzales. T. Toulkeridis. 2022. Synthesis of Iron, Zinc, and Manganese Nanofertilizers, Using Andean Blueberry Extract, and Their Effect in the Growth of Cabbage and Lupin Plants. *Nanomaterials.*12(11): 1-20.
27. Novaland. 2021. Novaland is a new generation of high accuracy fertilizers. [en línea]. < <https://www.lgt.tw/novaland.html>>. [Consulta: 17 de julio del 2023].
28. Nualgi Nanobiotech. 2019. Productos. [en línea]. <http://balittanah.litbang.deptan.go.id/dokumentasi/lainnya/f_agus_adelaide.pdf>. [Consulta: 20 de julio 2023].
29. Patil, S. y R. Chandrasekaran. 2020. Biogenic nanoparticles: a comprehensive perspective in synthesis, characterization, application and its challenges. *J Genet Eng Biotechnol.* 18(1): 1-23.

30. Plant Health Care. 2022. PHC® Nano K. [en línea]. Portal Tecnoagricola. <<https://www.buscador.portaltecnogricola.com/vademecum/mex/producto/30160/PHC%C2%AE%20NANO%20K>>. [Consulta: 17 de Julio del 2023].
31. Poole Jr, C. y F.J. Owens. 2007. Introducción a la Nanotecnología. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.
32. Precedence Research., 2022. Nano-Fertilizers Market (By Category: Nanoscale Fertilizer, Nanoscale Additive Fertilizer, Nanoscale Coating Fertilizer; By Raw Material: Silver, Copper, Aluminium, Carbon, Others; By Application: Plastic, Metal, Ceramic, Others; By Method of Application: Soil Method of Application, Foliar or Spray Method of Application, Soaking Method; By Crop Type) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2022-2030. [en línea]. <https://www.precedenceresearch.com/nano-fertilizers-market>. [Consulta: 22 de Julio 2023].
33. Salama, D.M., M.E. Abd El-Aziz. E.A. Shaaban. S.A. Osman. M.S. Abd El-Wahed. 2022. The impact of nanofertilizer on agro-morphological criteria, yield, and genomic stability of common bean (*Phaseolus vulgaris L.*). Sci. Rep. 12(18552):1 – 15.
34. Sheoran, P., G. Sapna. S. Kumari. y S. Goel. 2021. Enhancement of growth and yield, leaching reduction in *Triticum aestivum* using biogenic synthesized zinc oxide nanofertilizer. Biocatal. Agric. Biotechnol. 32, 1-6.
35. Singh, J., S. Kumar. A. Alok. S. Kumar. M. Rawat. D.C.W. Tsang. N. Bolan. K. Kim. 2019. The potential of green synthesized zinc oxide nanoparticles as nutrient source for plant growth. J. Clean. Prod. 214, 1061-1070.
36. Singh, N. A., 2017. Nanotechnology innovations, industrial applications and patents. Environ Chem Lett. 15(2): 185 -191.
37. Thamilarasan, V., V. Sethuraman. K. Gopinath. C. Balalakshmi. M. Govindarajan. RA Mothana. NA Siddiqui. JM Khaled. G. Benelli. 2018. Single step fabrication of chitosan nanocrystals using *Penaeus semisulcatus*: potential as new insecticides, antimicrobials and plant growth promoters. J. Cluster Sci., 29: 375 - 384.
38. Van, S.N., H.D. Minh y D.N. Anh. 2013. Study on chitosan nanoparticles on biophysical characteristics and growth of Robusta coffee in green house. Biocatal. Agric. Biotechnol. 2(4):289 - 294.