



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN NANOCIENCIAS Y MATERIALES

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE
TITANATO EN LA GERMINACIÓN DE CHILE SERRANO,
*CAPSICUM ANNUM.***

Tesis que presenta

Brianda Gabriela Robledo Trujillo

Para obtener el grado de

Maestra en Nanociencias y Materiales

**Director de la Tesis:
Dr. Vicente Rodríguez González**

San Luis Potosí, S.L.P., Julio de 2023



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Evaluación del efecto del titanato de hidrógeno dopado con N, P y K en el cultivo de la planta de chile serrano**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Nanociencias y Materiales fue elaborada por **Brianda Gabriela Robledo Trujillo** y aprobada el **día de mes de 2023** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Vicente Rodríguez González
Director/Codirectores de la tesis

Dr. Erik Díaz Cervantes
Miembro del Comité Tutorial

Dr. Jorge Roberto Oliva Uc
Miembro del Comité Tutorial

Dra. Luz Elena Vidález Rodríguez
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Materiales y catálisis heterogénea de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Vicente Rodríguez González.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 002877 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Acta de examen

Dedicatoria

Principalmente dedico este trabajo a mi hija Victoria Noemí Torres Robledo por haber sido y seguir siendo mi motor día a día para salir adelante y hacerme ser mejor persona en todos los aspectos, recuerda que te amo mucho y que siempre estaré por y para ti.

A mis padres, hermanos y familia, esto no hubiera sido posible sin todo el apoyo que me han brindado en todo momento, con orgullo puedo decir de nuevo que este logro no es solo mío, es nuestro. Les amo con todo mi ser.

A mis amigos por hacer de este proceso algo más llevadero, por escucharme, aconsejarme, procurarme y ayudarme, los TQM.

A Dios por mostrarme el camino, por planear lo mejor para mí y mantenerme siempre con fuerza.

A mí, por no darme por vencida, creer siempre en mí misma y en lo que soy capaz de lograr.

“En la profundidad del invierno, finalmente aprendí que dentro de mí yace un verano invencible.”

Albert Camus

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Vicente Rodríguez González por el apoyo, paciencia, confianza y asesoramiento constante durante toda la trayectoria que ha tomado la realización de este trabajo, que no ha sido solamente un año.

Al mi comité tutorial, el Dr. Jorge Roberto Oliva Uc, Dra. Luz Elena Vidález Rodríguez y Dr. Erik Díaz Cervantes por dedicarse el tiempo para leer mi tesis, estar presentes en mis avances y hacer las correcciones convenientes.

Al Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN) y sus técnicos por permitirme el uso de su infraestructura para poder llevar a cabo la preparación de mis muestras y su respectiva caracterización.

A todos mis compañeros del grupo de trabajo del laboratorio catálisis heterogénea y nuevos materiales por sus contribuciones durante el trabajo de esta tesis.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica por haberme brindado la oportunidad para desarrollarme en este aspecto académico y profesional, darme acceso a las herramientas necesarias para llevar a cabo mi proyecto y por permitirme vivir y conocer nuevos conocimientos y experiencias.

Al proyecto CONACYT, Ciencia de frontera materiales activos para agricultura sustentable.

A mi familia y amigos por haberme apoyado en cada momento, por alentarme, por presionarme y por siempre tener fe en mí y en mi trabajo.

¡INFINITAS GRACIAS!

“Cuando miras a los ojos al dar gracias, pasa de una simple palabra a una manifestación de respeto.”

Anónimo

Resumen

Evaluación del efecto del titanato de hidrógeno dopado con N, P y K en el cultivo de la planta de chile serrano, es un trabajo que abarca el uso de nanomateriales en el área de la agricultura, un ejemplo, el dióxido de titanio (TiO_2) se ha utilizado desde años atrás debido a su bajo costo, fácil acceso, baja toxicidad y biocompatibilidad. El TiO_2 presenta propiedades de fotocátalisis cuando se expone a la luz ultravioleta, lo que le confiere actividades antibacterianas, remediación ambiental y degradación de contaminantes. Los titanatos de hidrógeno (TNT) son compuestos con propiedades similares al TiO_2 y se obtienen a través de la síntesis de productos basados en él, pueden tener diversas morfologías, como nanotubos, que presentan una baja absorción en la región visible y una menor tasa de recombinación de electrones y huecos generados por la luz.

Se sintetizaron por el método hidrotermal titanatos de hidrógeno dopados a diferentes porcentajes p/p (2% y 5%) de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), que son elementos macronutrientes para los cultivos. Estos materiales se caracterizaron por diferentes técnicas de espectroscopía UV-Vis, espectroscopía FTIR, DRX y fisorción de nitrógeno, para después ponerlos en contacto directo con la semilla del chile serrano (*Capsicum annuum*) asegurando su contacto con la raíz, para finalmente evaluar su efecto en la germinación de esta.

Como resultados obtuvimos que hay ciertos aspectos esenciales en el desarrollo de una planta como lo son las condiciones climáticas a las que se expone el cultivo, así como el uso de diferentes sustratos para hacer crecer una planta, con la espuma fenólica obtuvimos largos de tallo arriba de los 40 mm. En lo que respecta a los materiales se obtuvieron resultados similares entre los diferentes materiales, sin embargo, se observó una mayor ventaja por los materiales que fueron dopados con N, ya que obtienen un área superficial más grande entre 350 y 400 m^2/g , sus porcentajes de germinación fueron del 100% en ambos sustratos (en el caso del dopaje al 2%N) y sus registros de tamaño fueron positivos.

NANOMATERIALES

CULTIVO

DOPAJE

FERTILIZANTE

Abstract

Evaluation of the effect of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K)-doped hydrogen titanate on the cultivation of serrano chili pepper plants is a study that include the use of nanomaterials in agriculture. For example, titanium dioxide (TiO_2) has been used for years due to its low cost, easy accessibility, low toxicity, and biocompatibility. TiO_2 exhibits photocatalytic properties when exposed to ultraviolet light, which gives it antibacterial activities, environmental remediation capabilities, and pollutant degradation. Hydrogen titanates (TNT) are compounds with properties similar to TiO_2 and can be obtained through synthesis based on it. They can have various morphologies, such as nanotubes, which have low absorption in the visible region and a lower rate of recombination of electrons and holes generated by light.

Hydrogen titanates doped with nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) at different weight percentages (2% and 5%) were synthesized using the hydrothermal method. These elements are macronutrients for crops. The materials were characterized using techniques such as UV-Vis spectroscopy, FTIR spectroscopy, XRD and nitrogen physisorption. Subsequently, they were brought into direct contact with serrano chili pepper (*Capsicum annuum*) seeds, ensuring contact with the roots, to evaluate their effect on the germination of it.

The results showed that there are certain essential aspects in the development of a plant, such as the climatic conditions to which the crop is exposed, as well as the use of different substrates for plant growth, with the phenolic foam we obtained stem lengths of over 40 mm. Regarding the materials, similar results were obtained among the different materials; however, materials doped with nitrogen (N) showed a greater advantage. They exhibited a larger surface area between 350 y 400 m^2/g , 100% germination rates in both substrates (in the case of 2%N doping), and positive size records.

NANOMATERIALS

CULTIVATION

DOPING

FERTILIZER

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	i
Créditos Institucionales	ii
Acta de examen	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract	vii
Contenido	viii
Lista de tablas	x
Tabla de imágenes	xi
1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
2.1 NANOMATERIALES	4
2.2 NANOPARTICULAS EN LA AGRICULTURA	4
2.3 NANOPARTÍCULAS A BASE DE DIÓXIDO DE TITANIO	5
2.4 NANOTUBOS DE TITANATOS DE HIDRÓGENO MODIFICADOS	7
2.5 NANOPARTÍCULAS A BASE DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LA AGRICULTURA	7
2.6 NUTRIENTES EN LAS PLANTAS	9
2.7 CULTIVO DEL CHILE COMO PLANTA MODELO	14
2.8 USO DE NP DE TiO₂ EN EL CULTIVO DEL CHILE.	16
2.9 USO DE DIFERENTES SUSTRATOS EN LOS CULTIVOS	17
2.9.2 ESPUMA FENOLICA	19
3. Planteamiento del problema	21
4. Hipótesis	22
5. Objetivos	23
6. Metodología	24
6.1 SÍNTESIS DE MATERIALES	24
6.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	24
6.3 PRUEBA PERLITA	26
6.3.1 SIEMBRA DE LA PLANTAS DE CHILE	26

6.4 PRUEBA CON ESPUMA FENÓLICA	28
6.4.1 SIEMBRA DE LA PLANTAS DE CHILE	28
7. Resultados y discusión	29
7.1 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE CHILE CON PERLITA	29
7.2 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE CHILE CON PERLITA – CICLO 2	36
7.3 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE CHILE PRUEBA CON ESPUMA FENÓLICA	42
7.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR ESPECTROSCOPIA UV-VIS	48
7.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR ESPECTROSCOPIA FTIR	50
7.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	52
7.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR FISISORCIÓN DE NITRÓGENO	54
7.8 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS POR ESPECTROSCOPIA UV-VIS	57
7.9 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS POR ESPECTROSCOPIA FTIR	58
7.10 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL TNT DESPUÉS DE SU USO POR ESPECTROSCOPIA FTIR	59
8. Conclusiones	60
Referencias bibliográficas	61
Abreviaturas	xii

Lista de tablas

Tabla 1. Medidas de las plántulas al día 30:	31
Tabla 2. Medidas de las plántulas (ciclo 2) al día 30:	37
Tabla 3. Medidas de las plántulas al día 15:	43
Tabla 4. Energía de banda prohibida (E_g) de los TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.	49
Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis de fisisorción de Nitrógeno de los TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.	55

Tabla de imágenes

Imagen 1) Diagrama de fotocátalisis	6
Imagen 2) Sistema de la rizosfera	14
Imagen 3) Triángulo textural de USDA	15
Imagen 4a) y 1b) celdas esterilizadas con perlita y nanopartículas en contacto con la semilla. 1c) Semilla en contacto con nanopartículas. 1d) Sistema de germinación montado	27
Imagen 5a) Semilla en contacto con nanopartículas. 2b) Sistema de germinación montado	28
Imagen 6) Plántulas en perlita a los 15 días desde su germinación.	29
Imagen 7a) y 5b) Plántulas a los 30 días desde su germinación. 5c) Plántula con raíz en contacto con nanopartículas. 5d) Raíz en contacto con nanopartículas.	30
Imagen 8) Porcentaje de germinación de las semillas de chile en perlita (prueba 1) al día 45	32
Imagen 9) Diámetro del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 1) al día 30	33
Imagen 10) Largo del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 1) al día 30	34
Imagen 11) Plántulas normales y anormlaes en perlita (ciclo 1)	35
Imagen 12) Porcentaje de germinación de las semillas de chile en perlita (ciclo 2) al día 45	38
Imagen 13) Diámetro del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 2) al día 30	39
Imagen 14) Largo del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 2) al día 30	40
Imagen 15) Plántulas en espuma fenólica a los 15 días desde su germinación.	42
Imagen 16) Porcentaje de germinación de las semillas de chile en espuma fenólica (prueba 2) a los 15 días desde su germinación	44
Imagen 17) Diámetro del tallo de las plántulas de chile en espuma fenólica (prueba 2) al día 15	45
Imagen 18) Largo del tallo de las plántulas de chile en espuma fenólica (prueba 2) al día 15	46
Imagen 19a) Plántulas normales. 19b) anormlaes en espuma fenólica (prueba 2)	47
Imagen 20) Espectro UV-Vis de TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.	48
Imagen 21) Espectro UV-Vis de energía de banda prohibida de TNT-X% sintetizados por el método hidrotermal.	49
Imagen 22a-b) Espectro FTIR de TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.	50
Imagen 23. Patrón de difracción de rayos x de a) TNT, TNT 2%N, TNT 5%N, b) TNT, TNT 2%P, TNT 5%P, c) TNT, TNT 2%K, TNT 5%K y d) TNT y P25 sintetizados por el método hidrotermal.	53
Imagen 24. se muestran las isothermas de adsorción (rojo) y desorción (azul) de los materiales a) TNT-2%N, b) TNT-5%N, c) TNT-2%P, d) TNT-5%P	54
Imagen 25. se muestran las isothermas de adsorción (rojo) y desorción (azul) de los materiales a) TNT-2%K, b) TNT-5%K, c) TNT, d) P25	55
Imagen 26) Espectro UV-Vis de ambos sustratos utilizados.	57
Imagen 27) Espectro FTIR de ambos sustratos utilizados	58
Imagen 28) Espectro FTIR de TNT antes y después de un uso.	59

1. Introducción

Desde hace 40 años, se ha observado un constante aumento de la población mundial, sumando mil millones de personas por década. Este crecimiento demográfico ha generado profundos cambios en innumerables aspectos de nuestra sociedad. A medida que la población aumenta, también lo hacen las necesidades, tanto complejas como el transporte, la vivienda, la educación y el trabajo, como las necesidades más básicas, como la higiene personal, la hidratación y la alimentación. Lamentablemente, este rápido incremento de la población ha llevado consigo un incremento en la contaminación ambiental, afectando ríos, mares, cascadas, cuerpos de agua, suelos, aire y contribuyendo a la deforestación, entre otros aspectos. Esta situación ha generado importantes cambios, daños y desventajas en múltiples áreas y actividades, siendo la agricultura una de las más afectadas, lo cual es alarmante, dado que es la principal fuente de obtención de alimentos a nivel mundial. Es en este contexto que surge la oportunidad de aplicar la nanotecnología en el ámbito agrícola.

La nanotecnología se refiere al uso de materiales y procesos a escala nanométrica, es decir, inferiores a 100 nanómetros (nm), con el objetivo de innovar y optimizar procesos y productos. En este campo, encontramos los nanomateriales, que son partículas naturales o sintéticas con dimensiones menores a 100 nm, conocidas como nanopartículas (NPs). Estos materiales se sintetizan y modifican con el fin de mejorar su rendimiento en diversos procesos. Pueden clasificarse en cerámicos, metales, polímeros y compuestos [1-6].

Existen numerosas nanopartículas que se han sintetizado a partir de diferentes compuestos y elementos, dependiendo del uso que se les quiera dar. Uno de los compuestos más utilizados es el dióxido de titanio (TiO_2), debido a su fácil acceso, bajo costo, baja toxicidad y compatibilidad con el medio ambiente. El TiO_2 presenta diversas propiedades según el método de obtención y la fase cristalina en la que se encuentre. Es un material semiconductor que, bajo la irradiación de luz ultravioleta (menor a 400 nm), posee propiedades de fotocatalisis, lo que le confiere actividades

antibacterianas, capacidad de remediación ambiental, generación de energía limpia, síntesis orgánica, degradación de contaminantes, entre otras [6-10].

Los titanatos de hidrógeno (TNT) son compuestos que se obtienen a partir de la síntesis con compuestos precursores de TiO_2 , lo que les confiere propiedades muy similares. Estos titanatos pueden obtenerse mediante diferentes métodos de síntesis, siendo el método hidrotermal la opción más adecuada en términos de tiempo, costo y facilidad del proceso. En este método, se llevan a cabo reacciones heterogéneas en un medio acuoso a temperaturas superiores a 100°C y una presión de 1 bar, donde los reactivos que son difíciles de disolver en agua se disuelven gracias a la acción del disolvente o mineralizadores [10-15].

Dependiendo del método de síntesis utilizado, es posible obtener nanopartículas con diversas morfologías, como fibras, esferas, alambres, tubos, láminas, rollos o varillas. Los titanatos con forma de nanotubos presentan una baja absorción en la región visible y una menor tasa de recombinación de pares electrón/hueco fotogenerados. Además, su mayor área superficial les confiere la ventaja de llevar a cabo reacciones de oxidación y reducción con patógenos cercanos [13-15], lo cual resulta beneficioso en aplicaciones agrícolas.

Desde hace años, se han utilizado nanopartículas basadas en TiO_2 en la agricultura, gracias a su biocompatibilidad, bajo costo y baja toxicidad. Se han obtenido resultados positivos, aunque su efectividad varía debido a factores como la concentración utilizada, la etapa del ciclo de cultivo en la que se aplica, la síntesis y pureza del material, así como la forma y método de aplicación en la planta [30-36]. Este último aspecto es especialmente relevante, ya que las plantas pueden absorber nutrientes de diferentes formas, como la absorción a través de las raíces, la asimilación de formas gaseosas y la asimilación a través de las hojas. La absorción a través de las raíces se encarga de captar todos los nutrientes presentes en la zona de la rizosfera de la planta, tanto iones inorgánicos como compuestos orgánicos. En esta zona, también se encuentran diversas especies microbianas beneficiosas. Los exudados radiculares liberados por las raíces son utilizados por las plantas para atraer y seleccionar microorganismos específicos, lo que puede

influir en la salud y el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, los exudados radiculares estimulan y establecen relaciones simbióticas con rizobios, hongos micorrízicos y rizobacterias, lo cual es beneficioso tanto para los microbios como para las plantas [40-42].

Es importante destacar que todos los nutrientes absorbidos por las plantas se distribuyen a través del sistema vascular, que comprende la raíz, el xilema y el floema. Esto permite que los nutrientes lleguen a todas las partes de la planta, incluyendo el crecimiento de las raíces, tallos, flores y frutos [40-44].

En este trabajo, se ha seleccionado el *Capsicum annuum* (chile serrano) como planta modelo, ya que México es el segundo país con mayor producción a nivel mundial [49-50]. En particular, en San Luis Potosí, México, se ocupa el cuarto lugar en producción de chile, generando aproximadamente entre 246,000 y 327,000 toneladas anuales [50-55].

El cultivo de chile serrano se desarrolla mejor en condiciones óptimas que son relativamente fáciles de alcanzar. Requiere temperaturas altas, entre 20 y 35°C, suelos con contenido adecuado de materia orgánica, una profundidad de entre 30 y 60 cm y un pH preferentemente en el rango de 5 a 6. Además, se adapta bien a suelos con textura ligera a media, que permitan una buena fluidez del agua y retención suficiente de humedad. Es importante mantener un riego bajo, uniforme y constante. Sin embargo, el cultivo puede enfrentar diversos desafíos, como bacterias, hongos, patógenos, plagas, virus y deficiencias nutricionales [56-57].

La aplicación de titanatos dopados con macronutrientes, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), durante la germinación de las semillas de chile, ofrece una doble ventaja. Por un lado, brinda un efecto fertilizante a la planta y, por otro lado, ayuda al crecimiento en diferentes etapas del cultivo, como la germinación, el desarrollo vegetal, la floración y el crecimiento del fruto.

2. Antecedentes

2.1 NANOMATERIALES

La nanotecnología ha surgido como un avance tecnológico-científico transformando distintas áreas como la alimentaria, textil, química, médica, tecnologías para la información y energía. Esto solo por mencionar algunas, donde se innovan y mejoran procesos [1].

El término nanomaterial incluye partículas naturales o sintéticas menores a 100 nanómetros (nm). Los nanomateriales (cerámicos, metales, polímeros y compósitos) son sintetizados y modificados con el fin de mejorar su desempeño en procesos tecnológicos y la composición del material difiere de acuerdo a su uso potencial [1-3]

Una industria mundial que mueve millones de dólares es la de fabricación de alimentos, y todas las grandes compañías de alimentos están buscando maneras de mejorar la eficiencia de la producción, inocuidad y las características de los alimentos. Para una industria donde la competencia es intensa y la innovación es vital, la nanotecnología ha surgido como una ayuda potencial para mejorar la producción de alimentos y la calidad de los mismos [1-5]

2.2 NANOPARTICULAS EN LA AGRICULTURA

La aplicación de la nanotecnología en diferentes sectores de la industria y la vida cotidiana ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, un ejemplo claro se puede ver en la agricultura, en la cual son proporcionadas herramientas novedosas para diferentes propósitos, como la detección rápida de enfermedades fitopatógenas y el mejoramiento en la capacidad de las plantas para absorber agua, nutrientes y pesticidas [2-5]. Sin embargo, el continuo uso de dichas nanopartículas (NP) ha causado gran controversia, ya que se han hecho diversos estudios que reportan resultados muy diferentes, tanto como positivos, como en algunos casos negativos. En consecuencia, al ser materiales externos y de naturaleza sintética, las NP se mantienen constantemente estudiadas debido a su uso y aplicación en la agricultura, lo cual conlleva la posibilidad de ser introducidas dentro del cuerpo humano al ser ingeridas en alimentos.

Por la literatura encontrada, se observa que generalmente en este tipo de estudios se llega a la conclusión de que hay factores que intervienen en el efecto de las NP, como lo son: su composición química, método de síntesis, concentración, método de aplicación y hasta el tipo de planta en el que se aplica. [2-3,31-32,58-61]. En este sentido, los efectos positivos de las NP pueden variar dependiendo de dichos factores, desarrollando así solo algunas propiedades en las plantas, ya sea de crecimiento o de protección.

2.3 NANOPARTÍCULAS A BASE DE DIÓXIDO DE TITANIO

El material más utilizado en este campo han sido las NP de dióxido de titanio, ya que es un compuesto biocompatible para su uso en la agricultura [6-8]. El TiO_2 presenta diferentes propiedades dependiendo de su método de obtención y de la fase cristalina en la que se encuentre, comúnmente lo encontramos en fase rutilo que es la fase más estable a temperatura ambiente y se caracteriza por una estructura cristalina tetragonal, seguida de la anatasa que tiene una estructura cristalina tetragonal, es menos estable que el rutilo y es la más común en las nanopartículas, y finalmente como brookita que tiene una estructura cristalina ortorrómbica. Es un material semiconductor tipo n que bajo la irradiación de luz ultravioleta (<400nm) sus electrones de la banda de valencia son transferidos hacia la banda de conducción, creando lo que se llama como pares hueco-electrón, los cuales se sitúan sobre la superficie del material generando reacciones químicas de oxidación y reducción [7-14]. Estas reacciones pueden llevarse a cabo con algunos patógenos encontrados en el suelo, agua o semillas y degradarlos o inactivarlos provocando así, una actividad antibacteriana que puede ser de gran utilidad para el proceso de cosecha de algunas plantas. Para que este proceso se lleve a cabo, es importante mencionar que debe existir una fuente de luz con suficiente energía para poder excitar los electrones de la banda de valencia, lo cual es complicado debido a que este proceso se lleva a cabo debajo de la tierra.

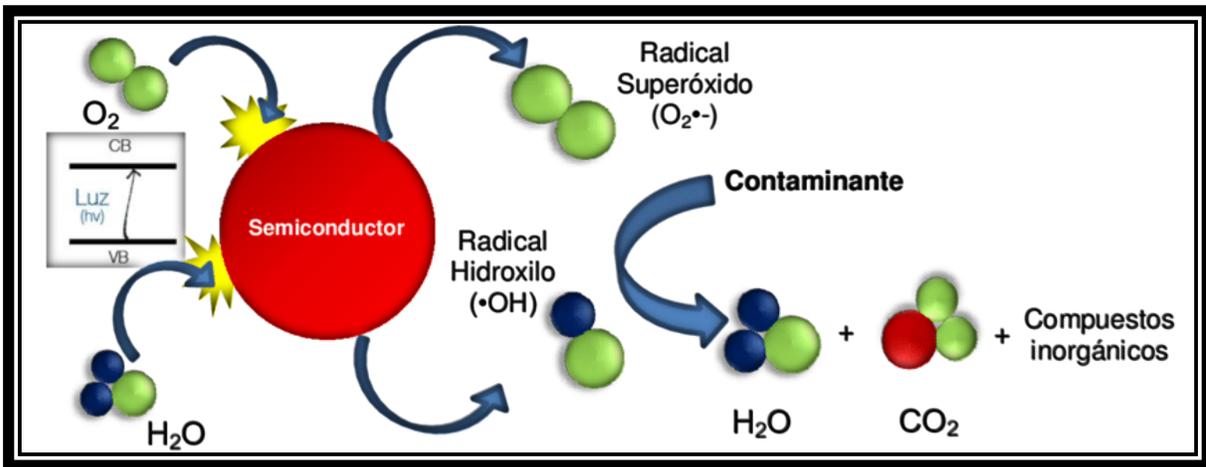


Imagen 1) Diagrama de fotocatalisis

Omo, A. y Fitzpatrick, P. (2013)

Los titanatos de hidrógeno (TNT) son compuestos que contienen titanio, oxígeno e hidrógeno en su estructura, presentan propiedades similares a las del TiO₂.

Existen 3 métodos para llevar a cabo la síntesis de titanatos a base de TiO₂: oxidación anódica, asistida por plantilla e hidrotérmal alcalina [10]. El método hidrotérmal es más simple en cuanto al procedimiento experimental y el costo.

Dependiendo del método de síntesis, se pueden obtener nanopartículas con diferentes morfologías como: fibras, esferas, alambres, tubos, láminas, rollos o varillas.

Se ha probado evidencia de que los nanotubos formados no son solo TiO₂ sino también titanatos. En la mayoría de las ocasiones los titanatos como dihidrogenodioxotitanato (IV) de hidrógeno (H₂Ti₂O₁₁ • H₂O), dihidrogenodioxotitanato (IV) de hidrógeno (H₂Ti₂O₅ • H₂O), tetrahidrogenodioxotitanato (IV) de hidrógeno (H₂Ti₄O₉ • H₂O), trihidrogenodioxotrititanato (IV) de hidrógeno (H₂Ti₃O₇ • H₂O) y titanatos de hidrógeno con la adición de iones de sodio (Na_xH₂Ti₃O₇) [15], entre otros, pueden coexistir o ser la fase predominante en la síntesis final producto.

Los titanatos con forma de nanotubo muestran una baja absorción en la región visible, alrededor de los 350 nm y tienen una menor tasa de recombinación de pares electrón/hueco fotogenerados en comparación con el TiO_2 [5-8], también presentan la ventaja de tener una mayor área superficial donde se pueden llevar a cabo las reacciones de oxidación y reducción con patógenos a su alrededor [16-18].

Por lo que se consideran nanoestructuras con gran impacto significativo por ser un material muy atractivo por sus propiedades catalíticas, biocompatibilidad, su área superficial, su accesibilidad y ser hidrofílico.

2.4 NANOTUBOS DE TITANATOS DE HIDRÓGENO MODIFICADOS

Existe una gran variedad de artículos donde se demuestra que existen diferentes metodologías para modificar las NP a base de TiO_2 con el fin de mejorar, aumentar y enfocar sus diferentes propiedades físico-químicas. Un método de modificación es el dopaje, este proceso consiste en agregar impurezas en concentraciones bajas (valores del orden de 10^{15} a 10^{20} átomos/ cm^3) en un semiconductor extremadamente puro con el fin de cambiar sus propiedades. Se ha dopado exitosamente el TiO_2 con elementos como el N, P, F, lantánidos, metales, entre otros. [16-18]. El dopar este material con elementos como el N y P es de suma importancia ya que algunos de estos elementos que más utilizados dentro de la agricultura, lo cual vuelve aún más interesante el estudio de la aplicación y los efectos de estos nanomateriales en los cultivos.

2.5 NANOPARTÍCULAS A BASE DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LA AGRICULTURA

El uso del TiO_2 en los alimentos ha sido ampliamente estudiado, ya que se ha comprobado que este compuesto se encuentra presente en ellos por diferentes vías, debido principalmente porque es utilizado como colorante y compuesto para productos de embalaje [29-31]. Tan comúnmente se puede encontrar que se ha establecido un límite máximo permisible para alimentos, ya que a pesar de tener

una baja toxicidad, es importante evitar una ingesta excesiva que pueda derivar en alguna intoxicación o producir algún efecto dañino a la salud. Su límite es de 10 µg/g, según la FAO [32].

Su uso en la agricultura se ha dado con 3 propósitos principales:

- Fertilizantes y promotores de crecimiento: Las nanopartículas de TiO₂ se pueden utilizar como aditivos en fertilizantes para mejorar la eficiencia de absorción de nutrientes por las plantas. Estas partículas pueden actuar como transportadores de nutrientes, facilitando la entrega controlada de nutrientes a las raíces de las plantas. Además, se ha observado que las nanopartículas de TiO₂ pueden estimular el crecimiento de las plantas al promover la división celular y la elongación de las células vegetales [19-29]
- Protección contra el estrés abiótico: Las nanopartículas de TiO₂ también pueden ayudar a mitigar los efectos negativos del estrés abiótico en las plantas, como la sequía, la salinidad y la radiación UV. Se ha demostrado que estas partículas actúan como protectores solares, reflejando y dispersando la radiación UV, lo que reduce el daño causado por la radiación ultravioleta en las plantas. Además, las nanopartículas de TiO₂ pueden mejorar la tolerancia de las plantas al estrés hídrico y salino al regular la apertura estomática y reducir la pérdida de agua por transpiración [29-31]
- Control de enfermedades y plagas: Las propiedades antimicrobianas y antifúngicas de las nanopartículas de TiO₂ han despertado interés en su uso para el control de enfermedades y plagas en la agricultura. Estas partículas pueden inhibir el crecimiento de bacterias, hongos y otros patógenos que afectan a las plantas. Además, las nanopartículas de TiO₂ pueden actuar como agentes repelentes o tóxicos para ciertos insectos y ácaros, lo que puede ayudar a reducir los daños causados por plagas [27-29].

Se han reportado diversos estudios sobre el uso de nanopartículas en cultivos como espinacas [59], espárragos [60], algas [33], maíz, frijol de soya [1, 61], pepino, arroz y tomate [1]. En general, estos estudios han mostrado resultados mayoritariamente positivos en términos de los efectos de las nanopartículas en el crecimiento y

desarrollo de los cultivos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar debido a una serie de factores, como la concentración de las nanopartículas, la etapa específica del ciclo de cultivo en la que se aplican, la forma y ubicación en la planta donde se aplican, así como la síntesis y pureza del material utilizado [29-35]. Estos factores pueden influir en la eficacia y los beneficios observados en cada caso particular.

2.6 NUTRIENTES EN LAS PLANTAS

Los nutrientes son vitales tanto para el crecimiento como para el desarrollo de las plantas. Obtienen estos nutrientes a través de la nutrición vegetal. Algunas vías de cómo los nutrientes llegan a una planta son:

- **Absorción de raíces:** Las raíces de una planta juegan un papel crucial en la absorción de nutrientes. Tienen pelos de raíz y una gran superficie que ayuda en la absorción de agua y nutrientes disueltos del suelo. Los nutrientes presentes en el suelo, se pueden encontrar como iones inorgánicos y compuestos orgánicos. Los iones inorgánicos son algunos elementos esenciales, como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y varios elementos traza en forma de iones inorgánicos. Estos iones se disuelven en el agua del suelo y son absorbidos por las raíces de la planta a través del proceso de transporte activo o difusión pasiva. En el caso de los compuestos orgánicos las plantas pueden absorber carbono (C) en forma de dióxido de carbono (CO_2) durante la fotosíntesis. De manera similar, las plantas pueden absorber formas orgánicas de nitrógeno, como aminoácidos o péptidos, cuando están disponibles en el suelo. Los quelatos son compuestos orgánicos que forman complejos con ciertos elementos, haciéndolos más solubles y disponibles para la absorción de las plantas. Los quelatos ayudan en la absorción de oligoelementos esenciales como hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn) [36-39]
- Las plantas también pueden absorber ciertos elementos en formas gaseosas. Por ejemplo, las plantas absorben oxígeno (O_2) a través de sus hojas y raíces, y pueden captar pequeñas cantidades de nitrógeno

atmosférico (N_2) a través de la fijación de nitrógeno que realizan ciertas bacterias. [37]

Todos los elementos son absorbidos por las raíces a través de procesos de transporte activo o pasivo.

- Transporte a la raíz: una vez que los nutrientes son absorbidos por los pelos de la raíz, se transportan a los tejidos internos de la raíz. Este transporte se produce a través de dos vías:
 - Vía apoplástica: los nutrientes se mueven a través de las paredes celulares y los espacios intercelulares, sin pasar por la membrana plasmática de las células de la raíz [40-42]
 - Vía simplástica: los nutrientes se mueven a través del citoplasma de las células de la raíz, cruzan la membrana plasmática y se mueven de una célula a otra a través de los plasmodesmos (canales que conectan las células adyacentes) [42-44]
- Transporte por xilema: después de ingresar a la raíz, los nutrientes se transportan hacia arriba a través de la planta a través de un tejido llamado xilema. Los vasos del xilema se extienden desde las raíces hasta los brotes y transportan agua junto con los nutrientes disueltos absorbidos por las raíces. Este proceso se conoce como translocación [45-48]
- Asimilación de la hoja: una vez que los nutrientes llegan a las hojas a través de los vasos del xilema, la planta los utiliza para varios procesos metabólicos. Las hojas contienen células especializadas llamadas células del mesófilo, que son responsables de la fotosíntesis. Los nutrientes como el dióxido de carbono, que se obtienen de la atmósfera, se combinan con el agua y la luz solar para producir glucosa (un azúcar) y oxígeno a través de la fotosíntesis. [36-42]
- Transporte por floema: Los azúcares sintetizados y otros compuestos orgánicos producidos durante la fotosíntesis son transportados a diferentes partes de la planta a través de otro tejido llamado floema. Este proceso de transporte se conoce como translocación. El floema mueve los nutrientes hacia arriba y hacia abajo para suministrar energía y recursos a los tejidos

en crecimiento, los órganos de almacenamiento y otras partes de la planta [36-42].

- Distribución y almacenamiento: a medida que los nutrientes llegan a varias partes de la planta a través del transporte del floema, se distribuyen a las áreas donde más se necesitan, como el crecimiento de raíces, tallos, flores y frutos. Algunos nutrientes también se almacenan en órganos específicos de la planta, como el almidón en tubérculos o frutas, para su uso posterior [36-42]

Los elementos son absorbidos por las plantas en varias formas dependiendo del elemento y sus propiedades químicas. Las principales formas en que los elementos son absorbidos por las plantas incluyen:

La absorción de iones nutrientes en las plantas es un proceso vital que les permite obtener elementos esenciales necesarios para su crecimiento y desarrollo [32-40]. Las plantas absorben los iones de nutrientes del suelo a través de sus raíces, por medio de diferentes procesos, ahondando un poco más en las vías de transporte:

- Difusión pasiva: algunos iones de nutrientes pueden difundirse pasivamente a través de las membranas celulares de los pelos de la raíz y entrar en las células de la raíz. Este proceso ocurre cuando existe un gradiente de concentración entre la solución del suelo y las células de la raíz [36-42].
- Transporte activo: la mayoría de los iones de nutrientes se absorben de esta manera, lo que requiere el gasto de energía por parte de la planta. El transporte activo ocurre cuando proteínas transportadoras específicas incrustadas en las membranas de las células de la raíz bombean activamente iones de nutrientes en contra de su gradiente de concentración, utilizando la energía del ATP (trifosfato de adenosina), desde un área de menor concentración en el suelo a un área de mayor concentración en las células de la raíz [40-42]. Este proceso permite que las plantas acumulen iones de nutrientes incluso cuando sus concentraciones en el suelo son bajas, también juega un papel crucial en la absorción de nutrientes, la regulación de

iones y el mantenimiento del equilibrio hídrico dentro de las células vegetales.

Algunos ejemplos:

- Absorción de iones: las plantas requieren varios iones minerales, como potasio (K^+), nitrato (NO_3^-) y fosfato (PO_4^{3-}), para su crecimiento y desarrollo. Sin embargo, las concentraciones de estos iones suelen ser más altas en el suelo que en el interior de las células vegetales. A través del transporte activo, las plantas usan proteínas transportadoras específicas en la membrana plasmática de las células de la raíz para bombear estos iones contra su gradiente de concentración hacia las células de la raíz, lo que les permite acumular nutrientes para un crecimiento adecuado [36-45].
- Absorción de agua: el agua es crucial para la supervivencia de las plantas, y las plantas transportan activamente iones y solutos a través de las células de sus raíces para mantener el equilibrio hídrico. Este proceso se conoce como captación activa de agua. Las plantas usan mecanismos de transporte activo para bombear iones, como potasio y cloruro, hacia las células de la raíz, creando un gradiente de concentración que impulsa el movimiento del agua hacia las células por ósmosis [36-45].
- Apertura y cierre de estomas: Los estomas son pequeñas aberturas en la superficie de las hojas y los tallos que permiten el intercambio de gases y controlan la pérdida de agua a través de la transpiración. La apertura y el cierre de los estomas están regulados por transporte activo. El transporte de iones de potasio hacia las células protectoras que rodean los estomas conduce a la absorción osmótica de agua, lo que hace que las células se hinchen y los estomas se abran. Por otro lado, el transporte activo de iones de potasio fuera de las células protectoras da como resultado la pérdida de agua y el cierre de los estoma [36-45].
- Carga y descarga del floema: El floema es un tejido especializado responsable del transporte de azúcares, aminoácidos y otras

moléculas orgánicas por toda la planta. El transporte activo está implicado en la carga de estas sustancias en el floema en las regiones de origen, como las hojas maduras, y su descarga en las regiones de sumidero, como los tejidos en crecimiento o los órganos de almacenamiento. El transporte activo de azúcares, facilitado por proteínas transportadoras, crea un gradiente de concentración que permite el movimiento de estas moléculas desde la fuente hasta el sumidero a través del floema.[36-45]

De igual manera existen las asociaciones de micorrizas: muchas plantas forman relaciones simbióticas con hongos benéficos llamados micorrizas. Estos hongos se asocian con las raíces de las plantas y mejoran la absorción de nutrientes. Las micorrizas pueden aumentar el área de superficie disponible para la absorción y también pueden liberar enzimas que descomponen la materia orgánica, lo que hace que los nutrientes sean más accesibles para la planta.

Las relaciones con poblaciones microbianas benéficas en la rizosfera ocurren en la hidroponía también al igual que en el campo, con especies microbianas diversas y beneficiosas encontradas en una amplia gama de diferentes sistemas sin suelo. Algunos de los exudados presentes son liberados por las raíces, que son usados por las plantas para atraer y seleccionar ciertos microorganismos en la rizosfera. Estos microbios pueden entonces funcionar, a través de diferentes mecanismos, para influenciar la salud y el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, los exudados radiculares actúan como signos que estimulan e inician una relación o simbiosis con rizóbios y hongos micorrízicos, así como con rizobacterias, lo que es beneficioso tanto para los microbios y para las plantas [45-48].

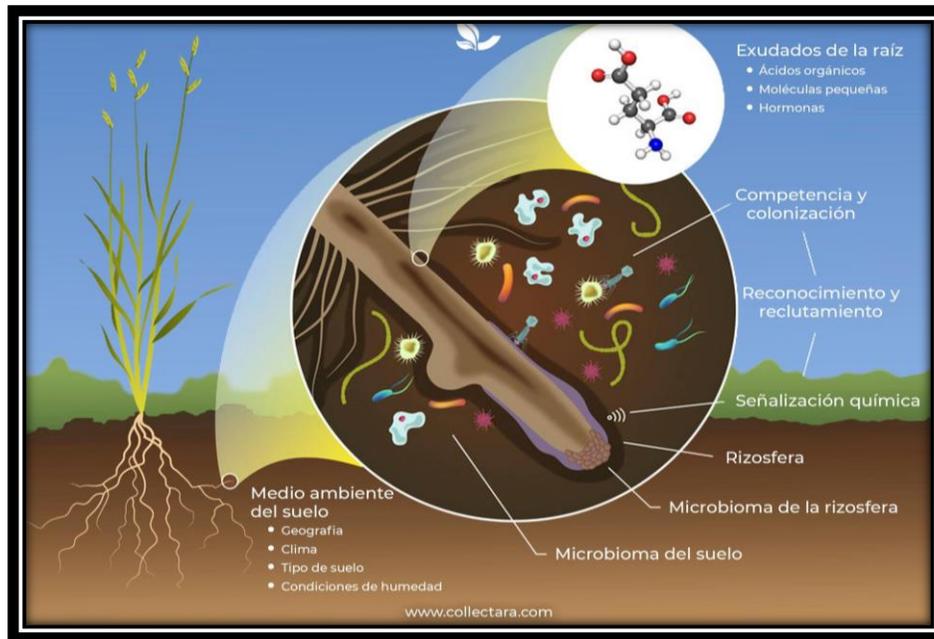


Imagen 2) Sistema de la rizosfera

Collect Tara (2021)

2.7 CULTIVO DEL CHILE COMO PLANTA MODELO

El chile serrano es una planta que pertenece a la familia de las solanáceas, del género *Capsicum* y de especie *annuum*, esta conforma parte de la gastronomía básica a nivel internacional, incluyendo principalmente a México. Puesto que es el segundo país con mayor producción a nivel mundial de chile serrano, aportando el 9.1%. Su producción anual es de más de tres millones 300 mil toneladas, seguido de China que fue reportado para 2018 como el principal productor a nivel mundial con el 49.45% de la producción, después de México se encuentran Turquía (6.9%), Indonesia (6.9%) y España (3.4%). Estos 5 países reunieron poco más del 75.0% de la producción mundial de chile y el 67.6% de la superficie cosechada en 2018 [49-50]. A nivel nacional, Sinaloa en 2019 fue el mayor productor de chile, produciendo el 23.4% de la producción, seguido de Chihuahua (21.0%), Zacatecas (13.9%), en cuarto lugar está San Luis Potosí (9.9%) y por último Sonora (5.9%). Estos 5 estados concentraron el 74.2% de la producción nacional [49-51]. La mayor parte de la producción del chile potosino se cultiva principalmente en la región de la

Zona Media, en los municipios de Río Verde, Cd. Fernández y Villa Juárez. Así mismo en el Altiplano, los municipios de Villa de Arista, Moctezuma, Venado, Vanegas, San Luis Potosí y en la Planicie Huasteca del municipio de Ébano. En este sentido, San Luis Potosí produce alrededor de 246,000 – 327,000 toneladas de chile; siendo Estados Unidos el principal comprador de chile verde en fresco a México, seguido de Tailandia [50-52]. Es por esto que es una de las plantas de consumo humano con un gran campo de aplicación y por eso fue seleccionada para este proyecto.

Es un cultivo que no necesita muchos cuidados, crece en áreas con temperaturas altas entre los 20 y 35°C, crece en suelos con amplio contenido de materia orgánica, profundidad de entre 30 y 6 cm y un pH de preferencia cercano al 5.5, se desarrolla mejor en suelos de tipo franco arenosos, franco limosos y franco arcillosos (en la figura 3 se muestra un diagrama de los tipos de suelo), es decir, suelos que tengan una textura de ligera a media[60-64], donde se permita una fluidez de agua y retención suficiente de humedad, se requiere un riego bajo, uniforme y constante [52-55].

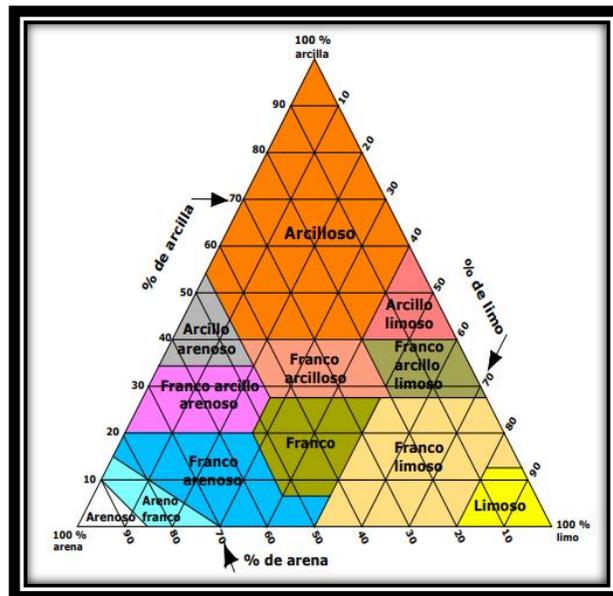


Imagen 3) Triángulo textural de USDA

González Arazo J. (2021)

Algunos de los problemas más comunes que presentan estas hortalizas son las bacterias, hongos, patógenos, plagas, virus y deficiencia de nutrientes [55-57]. Por lo que vemos un posible doble uso de nuestro material al aplicarlo en esta planta, ya que como se mencionó anteriormente, al dopar el material con elementos como lo son el N, P y K es posible que puedan translocar a la planta brindando un efecto de fertilizante, evitando la falta de nutrientes en el chile y ayudando al crecimiento de la planta en algunas de sus etapas de cultivo, dando un producto de mejor calidad.

2.8 USO DE NP DE TiO₂ EN EL CULTIVO DEL CHILE.

Existen estudios en donde se han aplicado NP de TiO₂ en el cultivo del chile para la degradación de algunos contaminantes, así como la eliminación de bacterias y hongos, al igual para evitar la pérdida de nutrientes en las diferentes etapas en el cultivo del chile principalmente en la germinación y la floración. De los cuales se obtienen resultados contradictorios, ya que en algunos el material ha brindado un efecto positivo en lo que respecta a parámetros de crecimiento y salud de la planta, mientras que en otros no se encuentra ningún efecto en el desarrollo de la planta [1,58-60].

Como anteriormente se comentó, es muy probable que esto suceda por la concentración y la forma en que se aplica el material en la planta, entre muchas variantes más que pueden afectar en el efecto de los materiales [65]. Se ha comprobado que NP menores de 20 nm entran a las células de las plantas [66], lo cual generalmente se trata de evitar para que no existan remanentes del material en el producto alimenticio [65-68].

Así mismo, se ha demostrado que una de las mejores vías de aplicación del material a la planta es por medio de la rizosfera que es la parte en donde las raíces están en contacto con la tierra, ya que por medio de la raíz se traslocan nutrientes y elementos necesarios para la planta por medio del xilema [69-70]. Por otro lado, al aplicar el material en forma de aerosol directo a las hojas aumenta el riesgo de

presencia de hongos, y en consecuencia, el ciclo de la hoja normal llega más rápido a su fin [71-73].

2.9 USO DE DIFERENTES SUSTRATOS EN LOS CULTIVOS

Hay diferentes tipos de sustratos utilizados para la germinación de semillas, cada una con sus propias características y beneficios. Algunos de los más comunes son el suelo, que viene siendo el sustrato tradicional y ampliamente utilizado para la germinación de semillas. Proporciona nutrientes esenciales, retención de humedad y un entorno estable para el desarrollo de plántulas. [74-75]

La turba de musgo es un sustrato orgánico natural con buenas propiedades de retención de humedad. Se usa comúnmente como un componente en las mezclas de inicio de semillas debido a su capacidad para retener agua y al mismo tiempo permitir un drenaje adecuado [76-79].

La vermiculita es un sustrato a base de minerales que mejora la aireación del suelo y la retención de humedad. A menudo se mezcla con otros materiales para crear un medio liviano y con buen drenaje adecuado para germinar semillas [76-79].

La perlita es un sustrato de roca volcánica liviano que proporciona un excelente drenaje y aireación. A menudo se usa en mezclas de semillas para prevenir la acumulación de agua y promover el desarrollo saludable de las raíces [76-79].

La fibra de coco es un sustrato sostenible y renovable hecho de cáscaras de coco. Tiene buenas capacidades de retención de agua, promueve el crecimiento de las raíces y ofrece un drenaje excelente [76-79].

La lana de roca o Rockwool es un sustrato sintético hecho de roca fundida o escoria hilada en fibras. Se usa comúnmente en sistemas hidropónicos, pero también se puede usar para la germinación de semillas. Esta proporciona una buena retención de humedad y un ambiente estéril [76-79].

La toalla de papel: Si bien no es un sustrato tradicional, se puede usar una toalla de papel húmeda para germinar semillas. Es simple, económico y permite una fácil

observación del proceso de germinación. Sin embargo, una vez que las semillas han brotado, deben transferirse a un medio de cultivo adecuado [76-79].

Y la espuma fenólica que a pesar de tener poco tiempo siendo utilizada en el área de agricultura ha dado una respuesta altamente positiva, ya que es un producto que permite una retención de agua como aeración óptima para muchos cultivos en hidroponía [76-79].

2.9.1 PERLITA

La perlita es un vidrio volcánico natural que se forma cuando la obsidiana, un tipo de roca volcánica, entra en contacto con el agua. Es un material amorfo liviano que tiene varias propiedades únicas que lo hacen útil en varias aplicaciones. [80]

La composición de la perlita puede variar ligeramente según su fuente, pero consiste principalmente en dióxido de silicio (SiO_2) en forma de alrededor de un 70-75 % de vidrio amorfo. Los componentes restantes incluyen óxido de aluminio (Al_2O_3) en alrededor de 12-16 %, óxido de potasio (K_2O) en 4-5 %, óxido de sodio (Na_2O) en 3-4 %, óxido de hierro (Fe_2O_3) en 1-2 % y pequeñas cantidades de otros elementos como el óxido de calcio (CaO), el óxido de magnesio (MgO) y el dióxido de titanio (TiO_2). [80-83]

El origen volcánico de la perlita contribuye a sus propiedades únicas. Cuando se calienta rápidamente a temperaturas de alrededor de 850-900 grados centígrados, las moléculas de agua atrapadas dentro de las partículas de perlita se vaporizan y expanden, lo que resulta en un aumento significativo de volumen. Este proceso de expansión es lo que le da a la perlita su característica estructura ligera y porosa [80-84].

Las partículas de perlita expandida son típicamente de color blanco o gris claro y tienen una estructura vítrea celular. Estas celdas o huecos en las partículas de perlita brindan excelentes propiedades de aislamiento, ya que atrapan el aire y reducen la transferencia de calor. Esto hace que la perlita sea útil en materiales de construcción, horticultura y aplicaciones de aislamiento.

Además de sus propiedades aislantes, la perlita también es químicamente inerte y tiene una baja densidad, lo que la convierte en un aditivo ideal para macetas y sustratos de cultivo. Ayuda a mejorar la aireación del suelo, el drenaje y la retención de agua, promoviendo un desarrollo de raíces más saludable para las plantas [80-84].

Además, la perlita no es tóxica y no se degrada con el tiempo, lo que la convierte en un material seguro y duradero para diversas aplicaciones. A menudo se utiliza en la construcción, yesos ligeros, rellenos, hormigón, protección contra incendios y medios de filtración [80-84].

En general, la composición de perlita principalmente de dióxido de silicio, junto con otros minerales, contribuye a sus propiedades únicas y versatilidad en una amplia gama de aplicaciones.

2.9.2 ESPUMA FENOLICA

La espuma fenólica se compone principalmente de dos componentes principales: resina fenólica y un agente de expansión. La resina fenólica: la espuma fenólica se deriva de una resina sintética llamada resina fenólica, que se produce al hacer reaccionar fenol (un compuesto aromático) con formaldehído. La resina actúa como aglutinante principal y proporciona a la espuma su integridad estructural y sus propiedades de resistencia al fuego. Las resinas fenólicas son conocidas por su excelente resistencia al calor y baja inflamabilidad [85-88].

El agente de expansión se agrega a la mezcla de resina fenólica para crear la estructura de la espuma. El agente de soplado es responsable de la expansión de la resina, lo que da como resultado la formación de una estructura celular con pequeñas bolsas de aire interconectadas. Los agentes de soplado más utilizados en la producción de espumas fenólicas suelen ser hidrocarburos o halocarburos [86-88].

Además de estos componentes principales, se pueden incorporar otros aditivos a la formulación de espuma fenólica para mejorar ciertas propiedades o mejorar el

procesamiento. Estos aditivos pueden incluir rellenos, estabilizadores, retardantes de llama y tensioactivos [86-88].

Vale la pena señalar que la composición exacta de la espuma fenólica puede variar según el fabricante y los requisitos específicos de la aplicación. Diferentes formulaciones pueden resultar en variaciones en la densidad de la espuma, conductividad térmica, resistencia al fuego y otras características de desempeño.

3. Planteamiento del problema

Con el incremento exponencial de la población mundial, la demanda de recursos necesarios para cubrir las necesidades básicas de los seres humanos ha aumentado considerablemente. Este crecimiento ha llevado consigo un aumento en la contaminación, lo que ha resultado en una notable disminución en la calidad del aire, del suelo y del agua debido a acciones tanto antropogénicas como naturales. Estos factores han desencadenado una serie de problemas en los cultivos agrícolas.

Los problemas a los que se enfrentan los cultivos abarcan desde el marchitamiento y las deformaciones morfológicas hasta alteraciones en las características de los frutos. Estos inconvenientes son causados por diversos agentes, como microorganismos, plagas, virosis, hongos y deficiencias nutricionales.

4. Hipótesis

Los titanatos de hidrógeno pueden tener efectos positivos en las diferentes etapas del cultivo del chile serrano, abarcando desde la germinación, crecimiento de la plántula, crecimiento vegetativo, floración y hasta la fructificación. Este material ofrece posibles beneficios en las semillas y raíces debido a sus propiedades fotocatalíticas. Además, es muy probable que presenten un efecto fertilizante, ya que las nanopartículas modificadas con macronutrientes pueden favorecer a un sano crecimiento de la planta y las raíces, disminuyendo el uso de fertilizantes y pesticidas.

5. Objetivos

Objetivo general:

- Estudiar los efectos derivados a la presencia de titanatos de hidrógeno en la germinación de la semilla de chile serrano (*Capsicum annum*).

Objetivos específicos:

- Sintetizar por método hidrotermal los TNT dopados al 2% y 5% con N, P y K.
- Caracterizar fisicoquímicamente los TNT dopados por medio de técnicas instrumentales, tales como UV-Vis, FTIR, DRX y fisisorción de nitrógeno.
- Evaluar la germinación de la semilla comercial con los titanatos, controles y blancos en 2 sustratos

6. Metodología

6.1 SÍNTESIS DE MATERIALES

Nanotubos a base de TiO_2 dopados al 2 y 5% con N, P y K fueron sintetizados por el método hidrotérmal asistido con microondas.

Se añadieron 0.002 kg de TiO_2 comercial (P25) en 0.08 L de una solución de NaOH (10 M) en baño de ultrasonido. Simultáneamente, el material dopante (2%N: 0.0002165 kg de glicina $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ Sigma Aldrich (99%), 5%N: 0.0005413 kg de glicina $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ Sigma Aldrich (99%), 2%P: 0.0001818 kg de fosfato de sodio $\text{H}_2\text{NaO}_4\text{P}\cdot\text{H}_2\text{O}$ Sigma Aldrich (98%), 5%P: 0.0004546 kg de fosfato de sodio $\text{H}_2\text{NaO}_4\text{P}\cdot\text{H}_2\text{O}$ Sigma Aldrich (98%), 2%K: 0.0000573 kg de hidróxido de potasio KOH Sigma Aldrich (99%), 5%K: 0.0001434 kg de hidróxido de potasio KOH Sigma Aldrich (99%)) fue adicionado en 0.020 L de agua desionizada bajo baño ultrasónico. Después de 10 minutos ambas soluciones fueron agitadas por 10 minutos más a temperatura ambiente. Enseguida, ambas soluciones fueron mezcladas en un recipiente de teflón. Luego, en un reactor asistido por microondas (marca EYELA MWO-1000) la solución fue sometida a 160°C , 750 rpm, 195 kW por 6 h. Posteriormente, la solución resultante fue enfriada a temperatura ambiente, se ajustó el pH a 3 por medio de HCl (5 N) y se lavó hasta alcanzar un pH cercano a 7. Finalmente, se filtró a vacío y la mezcla resultante fue secada en un horno a 100°C por 12 h.

6.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

- Caracterización de los materiales por espectroscopia UV-Vis

Esta técnica de caracterización fue utilizada para estudiar el comportamiento electrónico que presentan los materiales. Se analizaron espectros UV-Vis de reflectancia difusa y a partir de estos determinar la energía de banda prohibida (E_g) por medio del modelo de Kubelka-Munk, donde se estudia la pendiente de la curva de absorción, la cual presenta una caída exponencial. Para llevar a cabo esta caracterización se utilizó un espectrofotómetro UV-

Visible Cary 5000 UV-Vis-NIR, Agilent Technologies de reflectancia difusa. Los intervalos de mediciones para la absorción óptica se escanearon en el rango de 200 a 800 nm.

- Caracterización de los materiales por espectroscopía FTIR

Esta técnica de caracterización es utilizada para determinar las vibraciones y estiramientos de grupos funcionales presentes en los materiales analizados. Para llevar a cabo esta caracterización, se empleó un espectrómetro de absorción infrarroja con transformada de Fourier con punta de diamante, IR-Tracer-100 de Shimadzu. Los intervalos de medición de los espectros se corrieron de 400 a 4000 cm^{-1} con 40 iteraciones.

- Caracterización de los materiales por difracción de rayos X

Esta técnica de caracterización es utilizada para identificar las fases cristalinas presentes en los materiales sintetizados utilizando un difractómetro Bruker Advance 8 con una radiación incidente $\lambda=1.5404 \text{ \AA}$ ($\text{CuK}\alpha$) a 35kV y 25 mA. Los intervalos de mediciones fueron de los 4 a 70° en el ángulo de difracción (2θ). La indexación de los planos se llevó a cabo con referencias de la base de datos Joint Committee of Powder Diffraction Standards (JCPDS) y los cálculos de las direcciones de difracción mediante la ley de Bragg.

- Caracterización de los materiales por fisisorción de nitrógeno

Esta técnica de caracterización es utilizada para determinar el área superficial específica, la estructura porosa con base en tamaño y volumen de poro y el tipo de isoterma de adsorción-desorción que presenta el material. Los datos de los materiales sólidos fueron obtenidos con un equipo Quanta Chrome NOVAe 2000 e interpretados mediante el método BET (BrunauerEmmet-Teller). Previo al análisis, las muestras fueron desgasificadas en vacío a 120 °C durante 18 h.

6.3 PRUEBA PERLITA

6.3.1 SIEMBRA DE LA PLANTAS DE CHILE

Se germinan 48 semillas de chile serrano marca "MINA" en placas esterilizadas con 3.5 g de perlita en cada orificio de la placa, cada semilla en contacto directo con 1 mg de NP (4 con TNT 2%N, 4 con TNT 5%N, 4 con TNT 2%P, 4 con TNT 5%P, 4 con TNT 2%K, 4 con TNT 5%K, 4 con TNT, 4 con P25), con 10 mg NP como plantas con exceso de material (4 con TNT y 4 con P25) y como blancos se sembraron (4 solo con perlita y 4 solo con algodón como sustrato inocuo) para poder diferenciar si estas tienen algunos aspectos que diferentes de las que sí estuvieron en contacto con NP, también se usó el algodón como sustrato en los blanco para ver si la perlita tenía algún efecto en las semillas. Se mantuvieron resguardadas en el interior, expuestas 12 h a luz LED azul ($\lambda=400$ nm aproximadamente) de 7 am a 7 pm para asegurar las 12 horas diarias de luz que es requerido para este cultivo, a temperaturas entre 25° y 30° C, sin corriente de aire, sin exponerse directamente al sol y con riego diario de 1 ml de agua destilada con pH 5. Se registraron diariamente el crecimiento y novedades de cada planta, al día 15 y 30 se hacen mediciones de largo de tallo, desde donde comienzan las primeras hojas hasta donde comienza la raíz, y ancho de tallo, el diámetro del tallo en la parte de abajo donde comienzan a salir las primeras hojas, con un vernier digital.

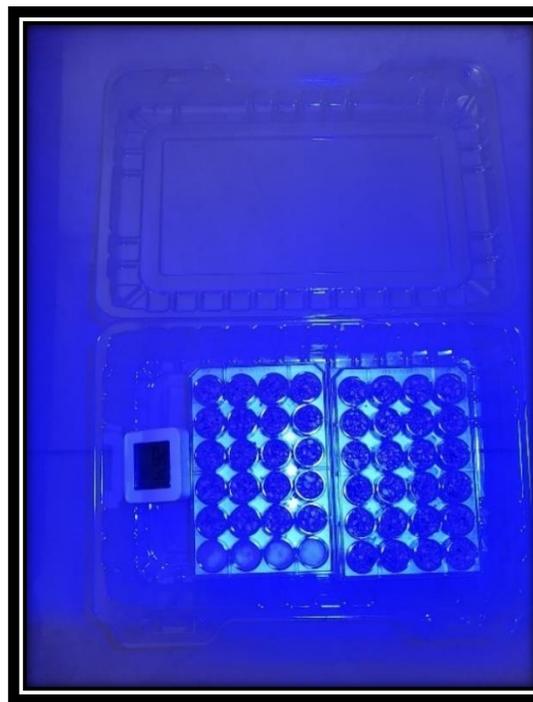
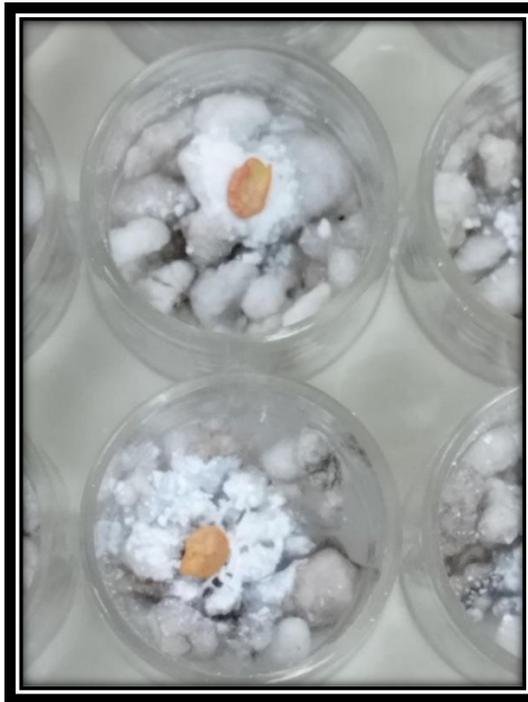
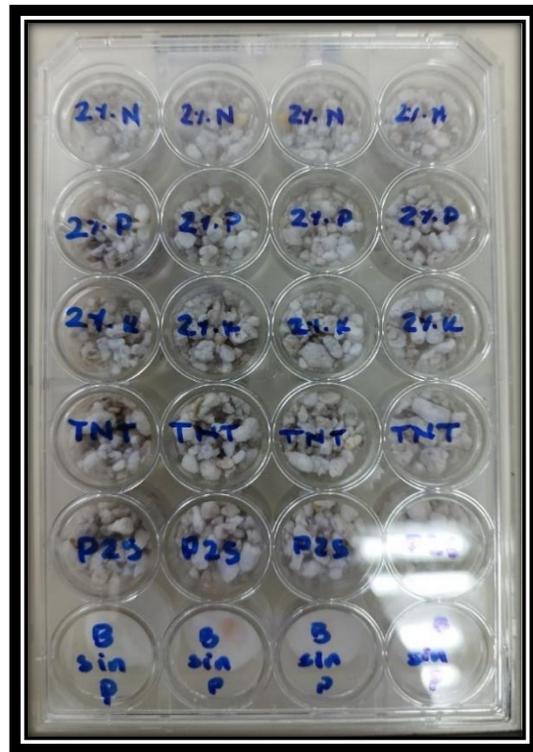
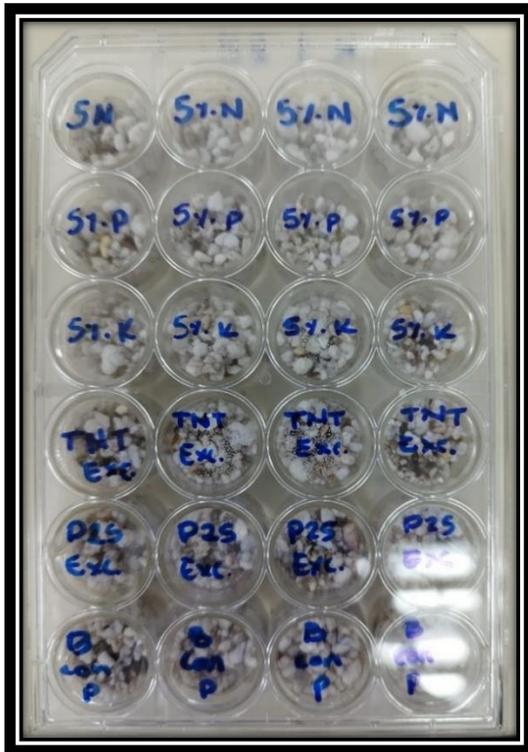


Imagen 4a) y 1b) celdas esterilizadas con perlita y nanopartículas en contacto con la semilla. **1c)** Semilla en contacto con nanopartículas. **1d)** Sistema de germinación montado

6.4 PRUEBA CON ESPUMA FENÓLICA

6.4.1 SIEMBRA DE LA PLANTAS DE CHILE

Se germinan 36 semillas de chile serrano marca MINA en espuma fenólica, cada semilla en contacto directo con 1 mg de NP (3 con TNT 2%N, 3 con TNT 5%N, 3 con TNT 2%P, 3 con TNT 5%P, 3 con TNT 2%K, 3 con TNT, 3 con P25), con 10 mg de NP como muestras con exceso de material (3 con TNT y 3 con P25) y 6 blancos, es decir, sin ningún material para poder diferenciar si estas tienen algunos aspectos que diferentes de las que si estuvieron en contacto con NP. Se mantuvieron resguardadas en el interior, expuestas 12 h a luz LED azul ($\lambda=400$ nm aproximadamente) de 7 am a 7 pm para asegurar las 12 horas diarias de luz que es requerido para este cultivo, a temperaturas entre 25° y 30° C, sin corriente de aire, sin exponerse directamente al sol y con riego constante y uniforme diariamente de 1 ml de agua destilada con pH 5 a cada semilla. Se registraron diariamente el crecimiento y novedades de cada planta, al día 15 y 30 se hacen mediciones de largo de tallo, desde donde comienzan las primeras hojas hasta donde comienza la raíz, y ancho de tallo, el diámetro del tallo en la parte de abajo donde comienzan a salir las primeras hojas, con un vernier digital.

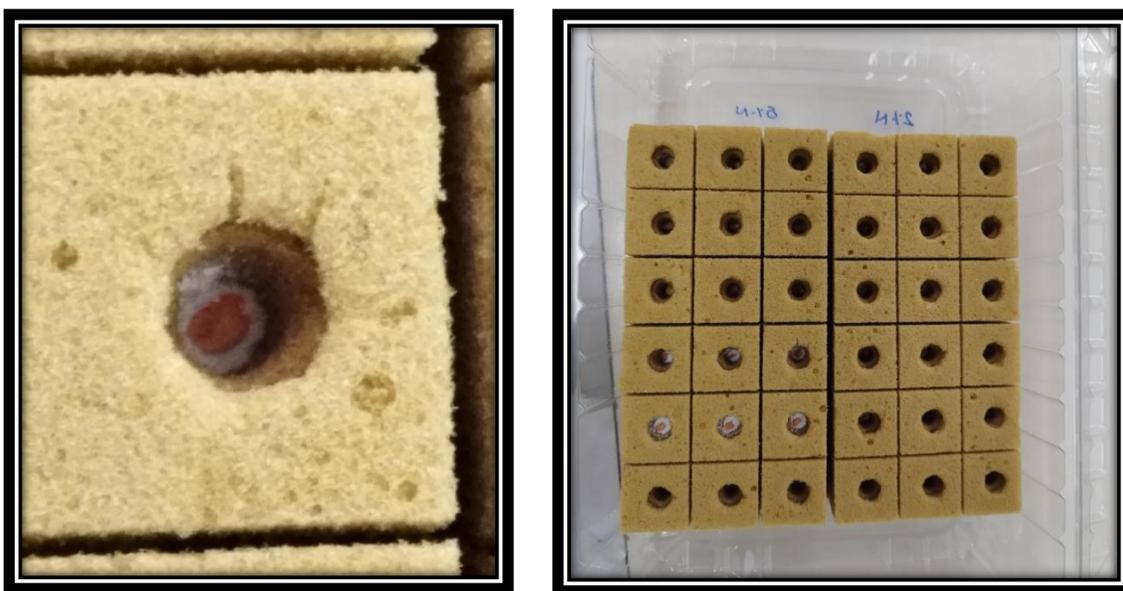


Imagen 5a) Semilla en contacto con nanopartículas. **2b)** Sistema de germinación montado

7. Resultados y discusión

7.1 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE CHILE CON PERLITA

Se lleva un control de temperatura y humedad diario, se regaron las semillas diariamente con 1 ml de agua destilada de pH 5. Se expusieron las semillas a 12 horas de luz led azul, de 7am – 7pm.

Se logró observar germinación de las primeras semillas al día 9 desde que se puso la semilla en contacto con las nanopartículas y el agua, al día 11 ya se observaban más semillas germinadas.

Al día 15 ya se pudieron obtener los datos para obtener un porcentaje de germinación, obteniendo:

$$\frac{\text{semillas germinadas}}{\text{semillas plantadas}} \times 100 = \text{porcentaje de semillas germinadas} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\frac{21 \text{ semillas germinadas}}{48 \text{ semillas plantadas}} \times 100 = 43.75$$



Imagen 6) Plántulas en perlita a los 15 días desde su germinación.

Sin embargo, se vuelve a calcular el porcentaje de germinación al día 30, ya que hubo semillas con crecimiento tardío:

$$\frac{32 \text{ semillas germinadas}}{48 \text{ semillas plantadas}} \times 100 = 66.66\%$$

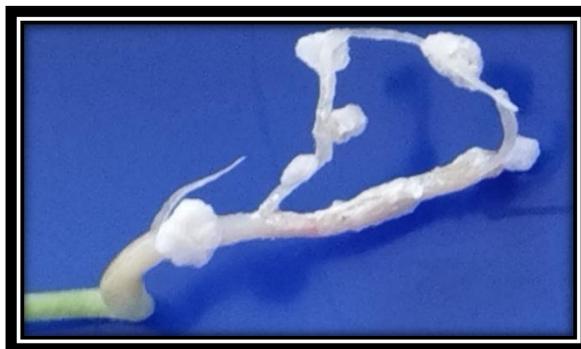
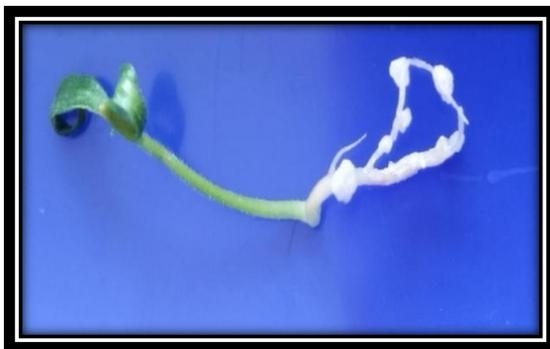


Imagen 7a) y 5b) Plántulas a los 30 días desde su germinación. 5c) Plántula con raíz en contacto con nanopartículas. 5d) Raíz en contacto con nanopartículas.

A continuación, se muestran en una tabla las medidas obtenidas de las plántulas al día 30, los cuáles serán discutidos a profundidad más adelante.

Tabla 1. Medidas de las plántulas al día 30:

PLANTA	DIÁMETRO (mm)	LARGO (mm)	OBSERVACIONES
2%N ₁	0.8	15.0	Sin observaciones (S/O)
2%N ₂	0.8	18.0	Hojas rizadas
2%N ₃	0.9	8.0	Semilla cerrada en hojas
2%N ₄	0.8	15.5	S/O
5%N ₁			No germinó (N/G)
5%N ₂	0.8	15.0	S/O
5%N ₃			N/G
5%N ₄	0.8	12.0	S/O
2%P ₁			N/G
2%P ₂	0.8	14.5	Semilla cerrada en hojas
2%P ₃	0.9	14.5	S/O
2%P ₄	0.8	12.5	Semilla en una hoja
5%P ₁			N/G
5%P ₂	0.8	15.5	S/O
5%P ₃			N/G
5%P ₄			N/G
2%K ₁	0.8	15.0	S/O
2%K ₂	0.8	18.0	Semilla en una hoja
2%K ₃			N/G
2%K ₄	0.8	17.0	S/O
5%K ₁	0.8	14.0	S/O
5%K ₂	0.9	10.5	Semilla cerrada en hojas
5%K ₃	1.0	10.5	Semilla cerrada en hojas
5%K ₄			N/G
TNT ₁	0.9	8.0	S/O
TNT ₂	0.8	16.5	S/O
TNT ₃			N/G
TNT ₄			N/G
P25 ₁	0.8	20.0	S/O
P25 ₂	0.8	17.0	S/O
P25 ₃			N/G
P25 ₄	0.8	18.5	S/O
TNT EXC ₁	0.8	11.0	Semilla cerrada en hojas

<i>TNT EXC₂</i>	0.8	10.5	Semilla cerrada en hojas
<i>TNT EXC₃</i>			N/G
<i>TNT EXC₄</i>			N/G
<i>P25 EXC₁</i>	0.8	24.0	Hojas rizadas
<i>P25 EXC₂</i>	0.8	19.0	S/O
<i>P25 EXC₃</i>	0.8	18.5	S/O
<i>P25 EXC₄</i>	0.8	22.0	S/O
<i>BLANCO CON PERLITA₁</i>	0.8	16.5	S/O
<i>BLANCO CON PERLITA₂</i>	0.8	23.0	Semilla en una hoja
<i>BLANCO CON PERLITA₃</i>	0.8	20.5	Hojas rizadas
<i>BLANCO CON PERLITA₄</i>			N/G
<i>BLANCO SIN PERLITA₁</i>	0.8	18.5	S/O
<i>BLANCO SIN PERLITA₂</i>			N/G
<i>BLANCO SIN PERLITA₃</i>			N/G
<i>BLANCO SIN PERLITA₄</i>			N/G

De la tabla 1 se obtienen diferentes datos como:

El porcentaje de germinación donde observamos una germinación del 100% en las semillas con 2%N, P25 en exceso y blanco sin perlita, un 75% para las semillas con 2%P, 2%K, 5%K, P25 y blanco con perlita, un 50% para las semillas con 5%N, TNT y TNT en exceso y 25% para las semillas con 5%P.

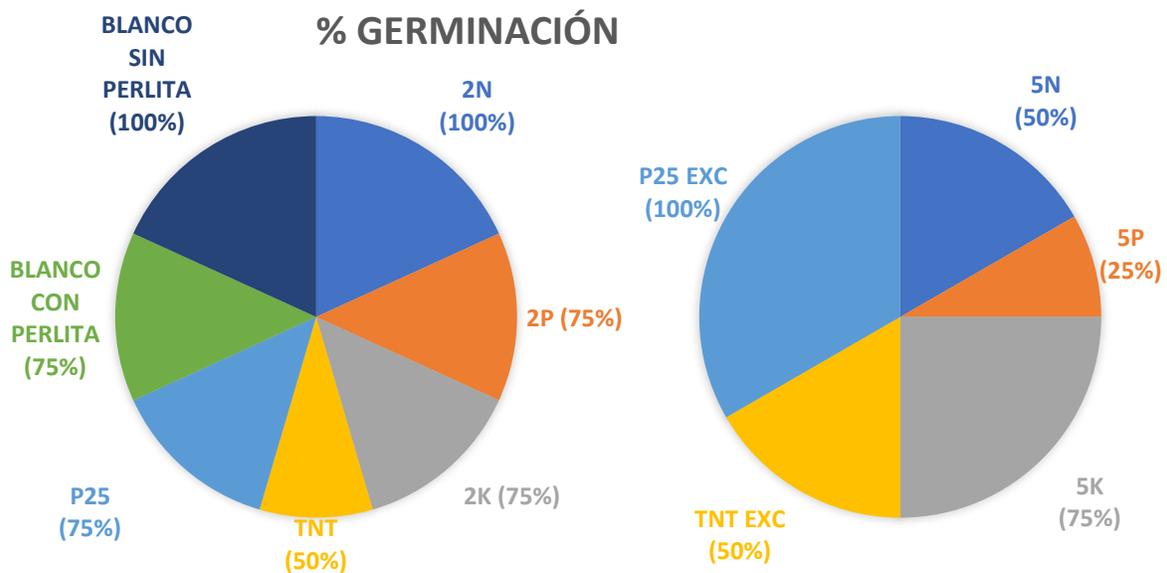


Imagen 8) Porcentaje de germinación de las semillas de chile en perlita (prueba 1) al día 45

Observando la gráfica obtenida (imagen 9) con los datos del diámetro del tallo podemos concluir que el promedio es de 0.8 mm que el 5%K aumentó en un 50% el ancho del tallo.

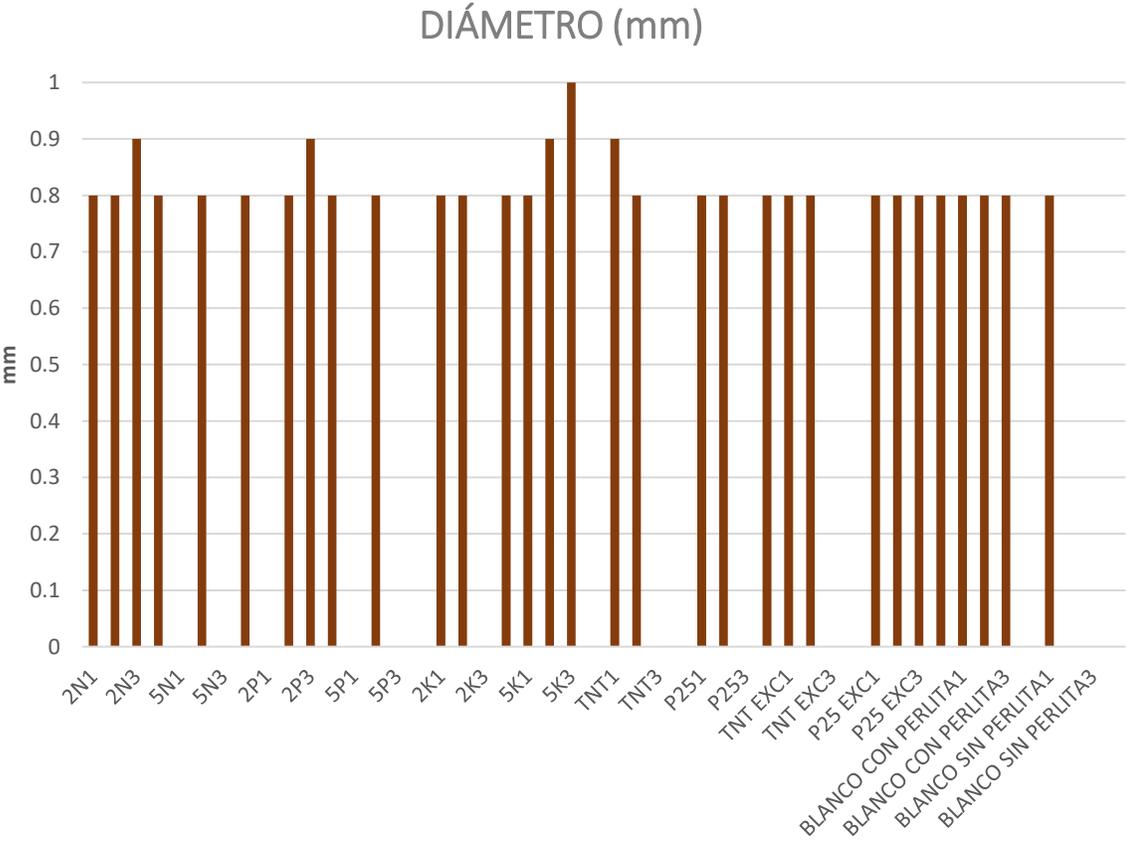


Imagen 9) Diámetro del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 1) al día 30

Observando la gráfica (imagen 10) con los datos del largo del tallo concluimos que se obtuvo un promedio de 16 mm, el 55% de las plántulas estuvo sobre el promedio. Las plántulas que tuvieron contacto con P25 así como los blancos arrojaron datos por encima del promedio en todos sus casos.

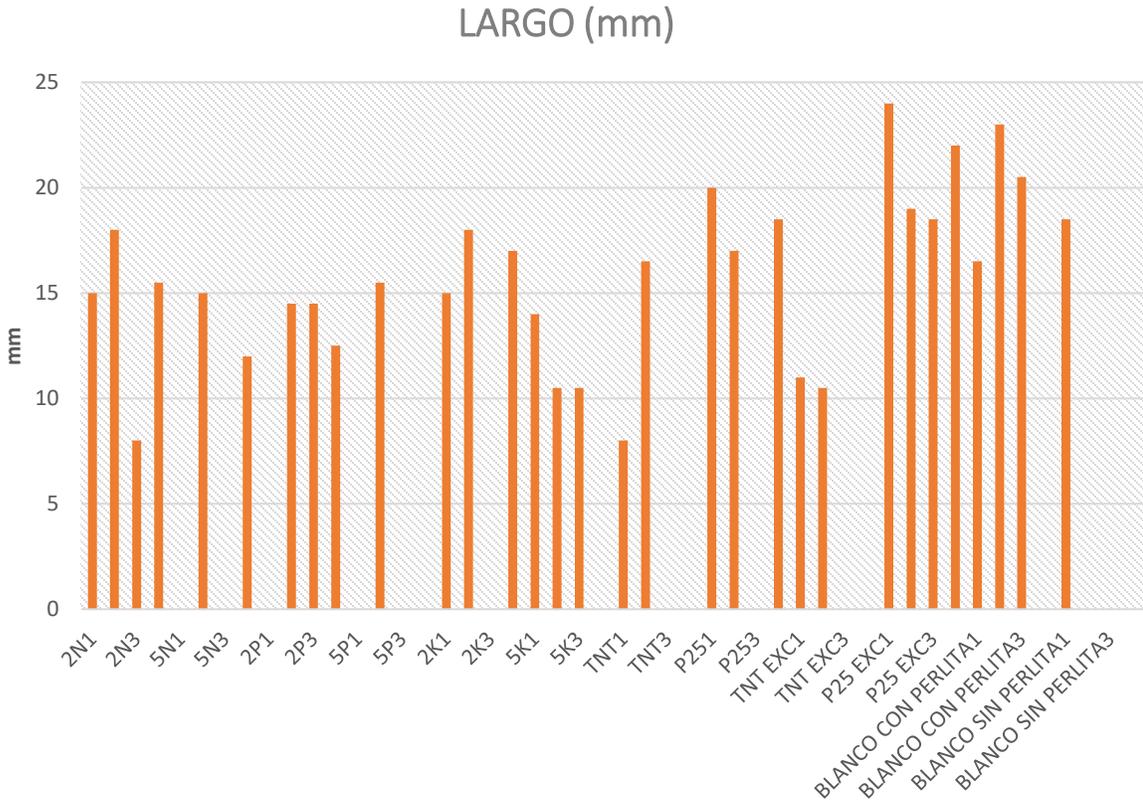


Imagen 10) Largo del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 1) al día 30

Como se muestra en la tabla se anotaron algunas observaciones de plántulas en las que las hojas tenían una morfología diferente debido al caparazón de la semilla, en algunas se observaba que una de las hojas se rizaba por el peso de la cáscara de la semilla y en otros casos las hojas aún no se apreciaban en el exterior porque quedaban dentro de la cáscara de la semilla aún. A estas plántulas se le denominaron como semillas anormales.

$$\frac{\text{semillas anormales}}{\text{semillas germinadas}} \times 100 = \text{porcentaje de semillas anormales} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\frac{10 \text{ semillas anormales}}{32 \text{ semillas germinadas}} \times 100 = 31.25\%$$



Imagen 11) Plántulas normales y anormales en perlita (ciclo 1)

El P25 aparentemente ayudó a la rápida germinación mientras que las semillas que estuvieron en contacto con las nanopartículas dopadas con potasio tuvieron una germinación notablemente más lenta, un largo menor lo cual provocó un aumento en el diámetro de su tallo.

Las semillas en contacto con P25 y los blancos tuvieron un largo de tallo más grande y una tasa de germinación mayor.

7.2 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE CHILE CON PERLITA – CICLO 2

En este caso se llevó a cabo la misma metodología anterior con la diferencia que se utilizó la misma placa, misma perlita y nanopartículas, para poder observar el funcionamiento del material en un segundo ciclo de uso.

Se lleva un control de temperatura y humedad diario, se regaron las semillas diariamente con 1 ml de agua destilada de pH 5. Se expusieron las semillas a 12 horas de luz led azul, de 7am – 7pm.

Al día 15 y 30 se hacen mediciones de largo de tallo, desde donde comienzan las primeras hojas hasta donde comienza la raíz, y ancho de tallo, el diámetro del tallo en la parte de abajo donde comienzan a salir las primeras hojas, con un vernier digital.

Se logró observar germinación de las primeras semillas al día 8 desde que se puso la semilla en contacto con las nanopartículas y el agua, al día 12 ya se observaban más semillas germinadas.

Al día 30 ya se pudieron obtener los datos para obtener un porcentaje de germinación, obteniendo:

$$\frac{34 \text{ semillas germinadas}}{48 \text{ semillas plantadas}} \times 100 = 70.83\%$$

A continuación, se muestran en una tabla las medidas obtenidas de las plántulas al día 30, los cuáles serán discutidos a profundidad más adelante.

Tabla 2. Medidas de las plántulas (ciclo 2) al día 30:

PLANTA	DIÁMETRO (mm)	LARGO (mm)	OBSERVACIONES
2%N ₁	0.8	16.0	Sin observaciones (S/O)
2%N ₂	0.8	15.5	S/O
2%N ₃	0.8	16.0	S/O
2%N ₄	0.9	17.0	Hojas rizadas
5%N ₁	0.8	14.5	S/O
5%N ₂	0.8	13.0	S/O
5%N ₃			No germinó (N/G)
5%N ₄			N/G
2%P ₁	0.9	15.0	S/O
2%P ₂	0.8	13.5	S/O
2%P ₃	0.8	14.5	S/O
2%P ₄	0.8	12.5	Semilla cerrada en hojas
5%P ₁	0.8	15.0	Semilla en hojas
5%P ₂			N/G
5%P ₃			N/G
5%P ₄			N/G
2%K ₁	0.8	16.0	S/O
2%K ₂	0.8	17.0	S/O
2%K ₃	0.8	18.0	S/O
2%K ₄	0.8	16.0	S/O
5%K ₁	0.9	11.0	Semilla en una hoja
5%K ₂	0.9	10.0	Semilla cerrada en hojas
5%K ₃			N/G
5%K ₄	0.8	14.0	Semilla cerrada en hojas
TNT ₁	0.8	16.0	S/O
TNT ₂	0.8	15.0	S/O
TNT ₃	0.9	9.0	Semilla en una hoja
TNT ₄			N/G
P25 ₁	0.8	20.0	S/O
P25 ₂	0.8	17.0	S/O
P25 ₃	0.8	18.0	S/O
P25 ₄	0.8	18.5	S/O
TNT EXC ₁	0.8	11.0	Semilla cerrada en hojas
TNT EXC ₂			N/G
TNT EXC ₃			N/G
TNT EXC ₄			N/G

<i>P25 EXC</i> ₁	0.8	22.0	Hojas rizadas
<i>P25 EXC</i> ₂	0.8	21.0	S/O
<i>P25 EXC</i> ₃	0.8	22.5	Semilla en hojas
<i>P25 EXC</i> ₄	0.8	20.0	S/O
<i>BLANCO CON PERLITA</i> ₁	0.8	17.0	S/O
<i>BLANCO CON PERLITA</i> ₂			N/G
<i>BLANCO CON PERLITA</i> ₃	0.8	20.5	Hojas rizadas
<i>BLANCO CON PERLITA</i> ₄	0.8	22.5	Semilla en una hoja
<i>BLANCO SIN PERLITA</i> ₁	0.8	18.5	S/O
<i>BLANCO SIN PERLITA</i> ₂	0.8	20.0	S/O
<i>BLANCO SIN PERLITA</i> ₃	0.8	21.5	S/O
<i>BLANCO SIN PERLITA</i> ₄	0.9	18.0	S/O

De la tabla 2 se obtienen diferentes datos como:

El porcentaje de germinación donde observamos una germinación del 100% en las semillas con 2%N, 2%P, P25, P25 en exceso y blanco sin perlita, un 75% para las semillas con 5%K, TNT y blanco con perlita, un 50% para las semillas con 5%N y 25% para las semillas con 5%P, 2%K y TNT en exceso.

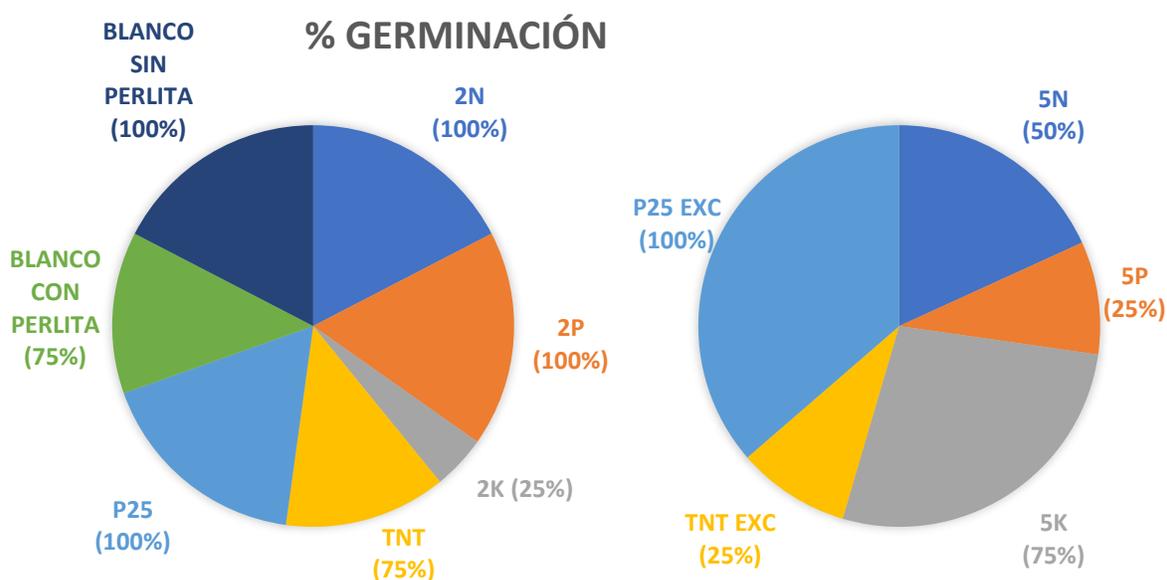


Imagen 12) Porcentaje de germinación de las semillas de chile en perlita (ciclo 2) al día 45

Al observar la gráfica (imagen 13) de los datos del diámetro del tallo, podemos concluir que el promedio es de 0.8 mm. Además, se observa que el uso del 5% de K (potasio) resultó en un aumento del 50% en el ancho del tallo. Esto sugiere que el crecimiento en longitud del tallo puede haber sido menor, concentrándose en cambio la cantidad de materia vegetativa en el diámetro.

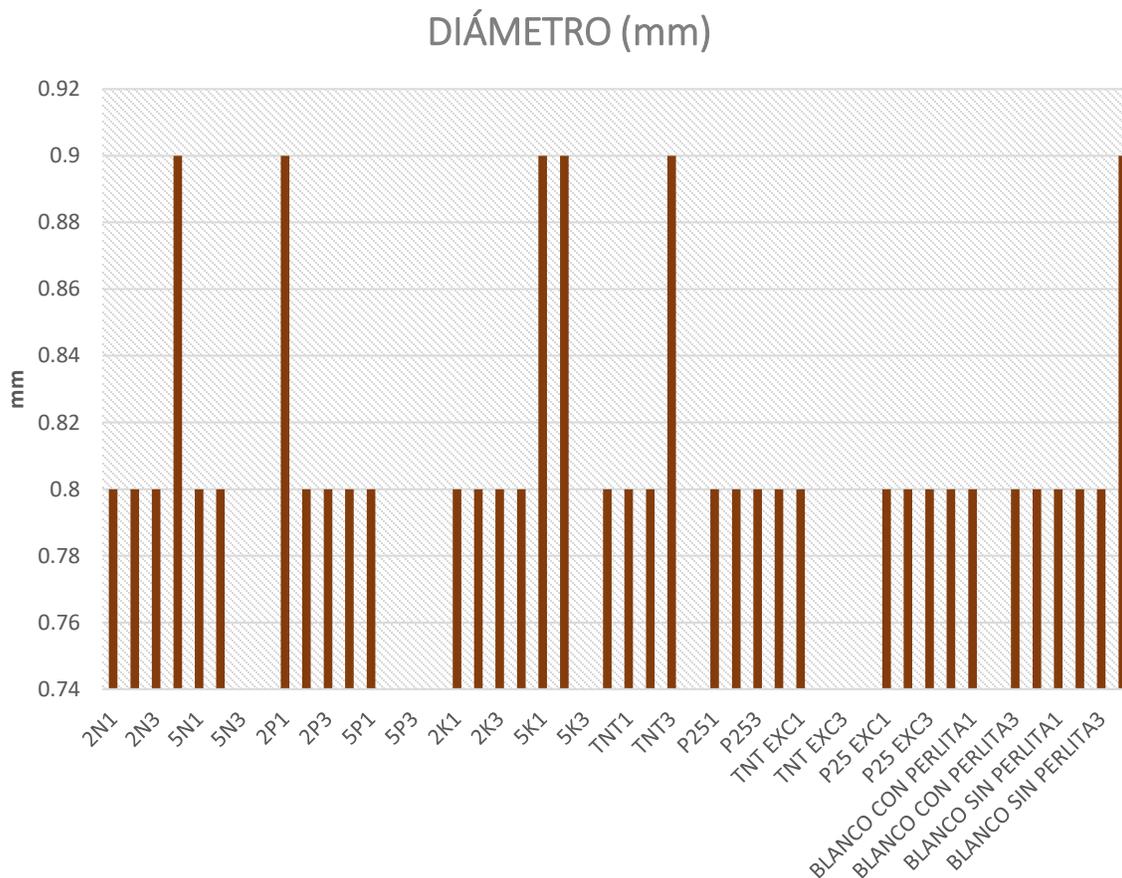


Imagen 13) Diámetro del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 2) al día 30

Al analizar la gráfica generada a partir de los datos del largo del tallo (imagen 14), podemos concluir que existe un promedio de 17 mm, el 49% de las plántulas estuvo por encima del promedio. Sin embargo, se puede notar que la presencia de P25, el exceso de P25, y las plántulas germinadas en perlita sin ningún material adicional, han mostrado un aumento en el largo del tallo. Estos resultados sugieren que estos factores podrían estar contribuyendo al crecimiento longitudinal de las plántulas.

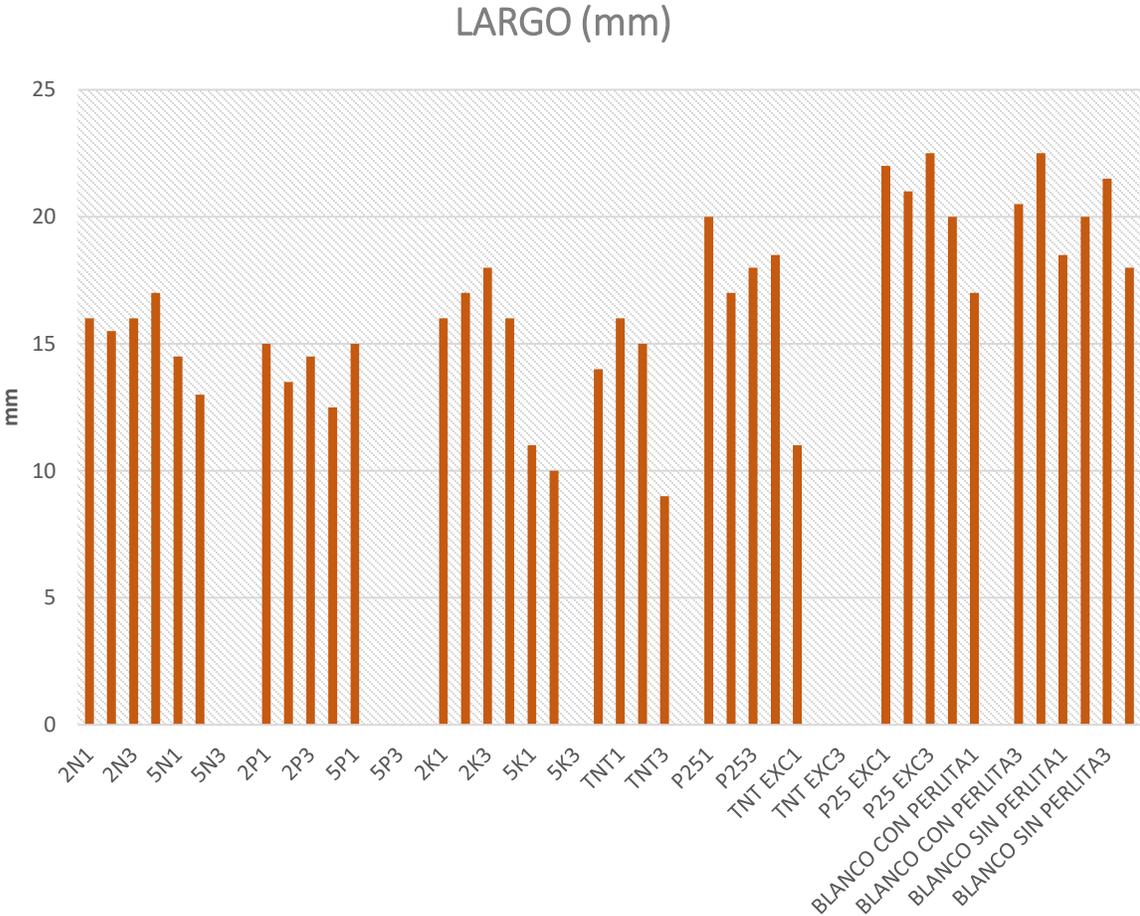


Imagen 14) Largo del tallo de las plántulas de chile en perlita (ciclo 2) al día 30

El porcentaje de semillas anormales para la prueba 1 en su segundo ciclo fue:

$$\frac{12 \text{ semillas anormales}}{34 \text{ semillas germinadas}} \times 100 = 35.29\%$$

Los resultados obtenidos indican que la presencia de P25 parece haber facilitado una germinación más rápida, mientras que las semillas en contacto con las nanopartículas dopadas con potasio y el exceso de TNT mostraron una germinación notablemente más lenta. Una vez más, se observa que los datos de longitud del tallo y la tasa de germinación fueron más altos para las semillas en contacto con P25, así como para aquellas que se germinaron en algodón en lugar de perlita. Además, las semillas dopadas con un 2% de nitrógeno y un 2% de fósforo lograron una tasa de germinación del 100%.

Para ambas pruebas en perlita, las plántulas que obtuvieron datos altos en el diámetro del tallo a la par obtenían datos muy bajos para el largo del tallo. Esto sugiere que el crecimiento en longitud del tallo puede haber sido menor, concentrándose la cantidad de materia vegetativa en el diámetro.

Las raíces mostraron notorio estrés, adjudicado al tamaño del orificio de la placa, ya que esto no le brindó suficiente espacio para crecer y desarrollarse óptimamente.

Es importante destacar que se logró obtener el contacto deseado entre la raíz y el material.

7.3 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE CHILE PRUEBA CON ESPUMA FENÓLICA

Se lleva un control de temperatura y humedad diario, se regaron las semillas diariamente con 1 ml de agua destilada de pH 5. Se expusieron las semillas a 12 horas de luz led azul, de 7am – 7pm.

Esta germinación se llevó a cabo en espuma fenólica como sustrato, se logró observar germinación de las primeras semillas al día 5 desde que se puso la semilla en contacto con las nanopartículas y el agua, al día 7 ya se observaban más semillas germinadas.

Al día 15 ya se pudieron obtener los datos para obtener un porcentaje de germinación, obteniendo:

$$\frac{32 \text{ semillas germinadas}}{36 \text{ semillas plantadas}} \times 100 = 88.88\%$$



Imagen 15) Plántulas en espuma fenólica a los 15 días desde su germinación.

A continuación, se muestran en una tabla las medidas obtenidas de las plántulas al día 15, los cuáles serán discutidos a profundidad más adelante.

Tabla 3. Medidas de las plántulas al día 15:

PLANTA	DIÁMETRO (mm)	LARGO (mm)	OBSERVACIONES
2%N ₁	0.8	22.0	Sin observaciones (S/O)
2%N ₂	0.8	21.0	Semilla en hojas
2%N ₃	0.8	40.0	S/O
5%N ₁	0.8	23.0	S/O
5%N ₂	0.8	24.0	S/O
5%N ₃	0.8	24.0	S/O
2%P ₁	0.9	18.0	Semilla en hojas
2%P ₂	0.8	22.0	Semilla en hojas
2%P ₃	0.9	22.0	S/O
5%P ₁	0.8	25.0	S/O
5%P ₂	0.8	25.0	S/O
5%P ₃			No germinó (N/G)
2%K ₁	0.8	17.0	Hojas rizadas
2%K ₂	0.8	23.0	S/O
2%K ₃	0.8	18.0	Semilla en hojas
5%K ₁	0.8	23.0	S/O
5%K ₂	0.8	23.0	S/O
5%K ₃	0.8	26.0	S/O
TNT ₁	0.8	17.0	Semilla en hojas
TNT ₂	0.8	22.0	Semilla en hojas
TNT ₃	0.8	22.0	S/O
P25 ₁	0.8	22.0	S/O
P25 ₂	0.8	23.0	S/O
P25 ₃			N/G
TNT EXC ₁	0.8	19.0	Hojas rizadas
TNT EXC ₂			N/G
TNT EXC ₃			N/G
P25 EXC ₁	0.8	22.0	S/O
P25 EXC ₂	0.8	23.0	S/O
P25 EXC ₃	0.8	39.0	S/O
BLANCO ₁	0.8	39.0	S/O
BLANCO ₂	0.8	18.0	Hojas rizadas
BLANCO ₃	0.8	40.0	S/O
BLANCO ₄	0.8	18.0	S/O
BLANCO ₅	0.9	17.0	Semilla en hojas
BLANCO ₆	0.8	24.0	S/O

De la tabla 3 se obtienen diferentes datos como:

El porcentaje de germinación donde se obtuvo un 100% para las semillas con 2%N, 5%N, 2%P, 2%K, 5%K, TNT, P25 en exceso y del blanco, se obtuvo un 75% para las semillas con 5%P y P25 y un 25% para las semillas con TNT

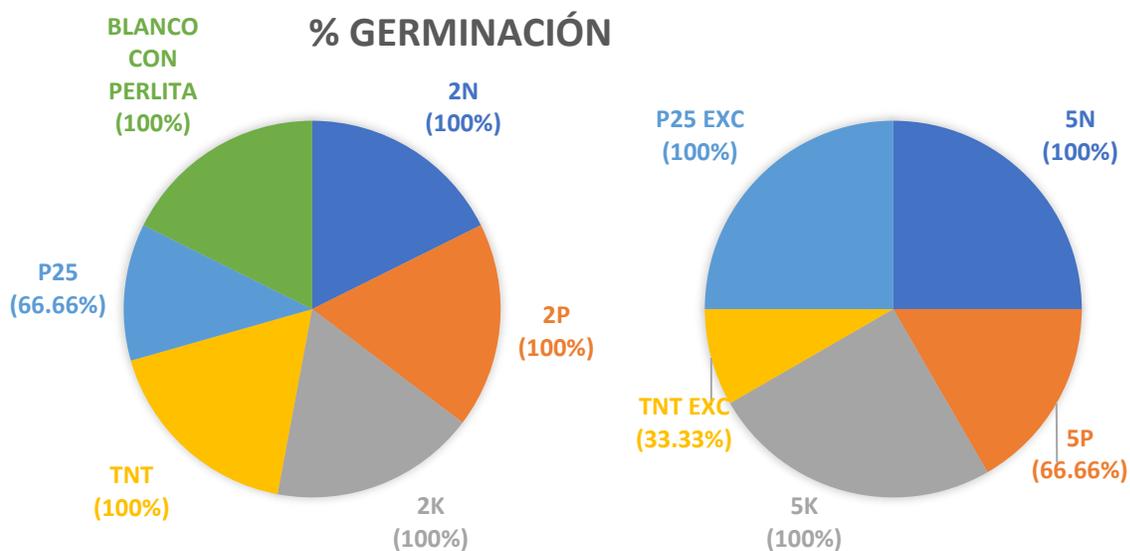


Imagen 16) Porcentaje de germinación de las semillas de chile en espuma fenólica (prueba 2) a los 15 días desde su germinación

Al analizar la gráfica generada a partir de los datos del diámetro del tallo (imagen 17), se puede concluir que el promedio es de 0.8 mm. Sin embargo, es importante destacar que la presencia del 2% de fósforo (2%P) resultó en un aumento del 66.66% en el ancho del tallo, alcanzando un valor de 0.9 mm. Este incremento en el ancho del tallo sugiere un mayor crecimiento en la plántula.

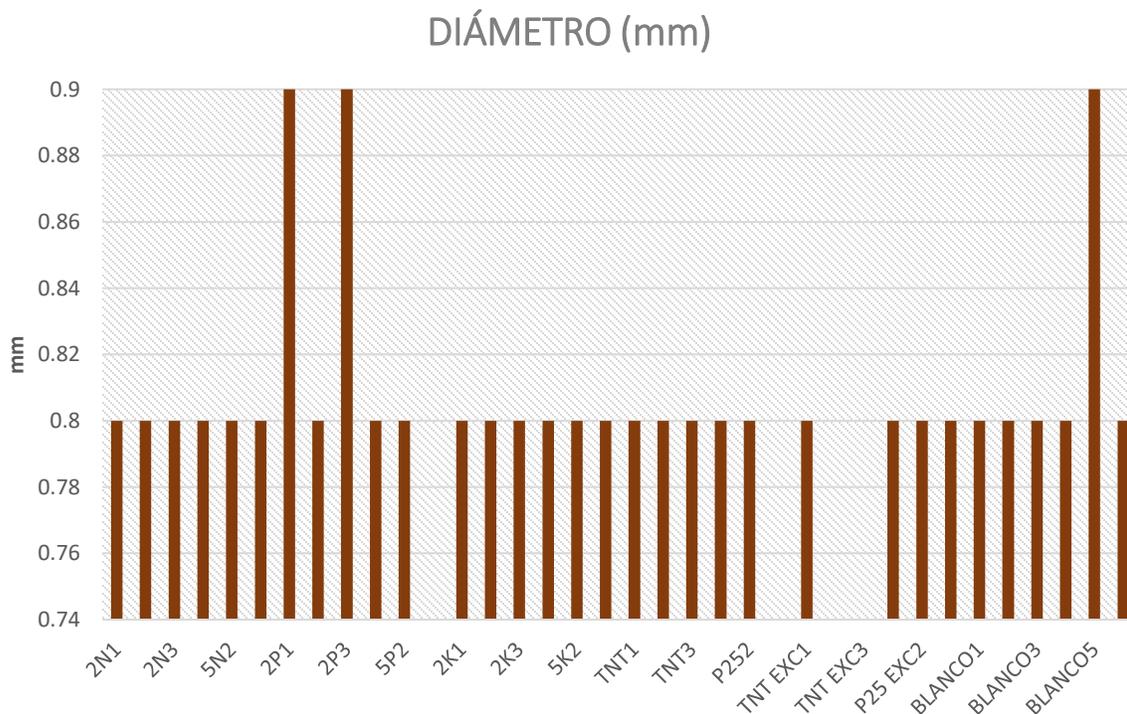


Imagen 17) Diámetro del tallo de las plántulas de chile en espuma fenólica (prueba 2) al día 15

Al analizar la gráfica generada a partir de los datos del largo del tallo (imagen 18), se puede concluir que hay un promedio de 24 mm, solamente el 32% estuvo por arriba de este promedio. No se observa ninguna ventaja o desventaja clara en cuanto al largo del tallo atribuible a los diferentes materiales utilizados. Sin embargo, se destaca que las plántulas que se germinaron sin ningún material adicional presentaron un aumento en el largo del tallo. Esto sugiere que la ausencia de materiales adicionales podría influir en el crecimiento longitudinal de las plántulas.

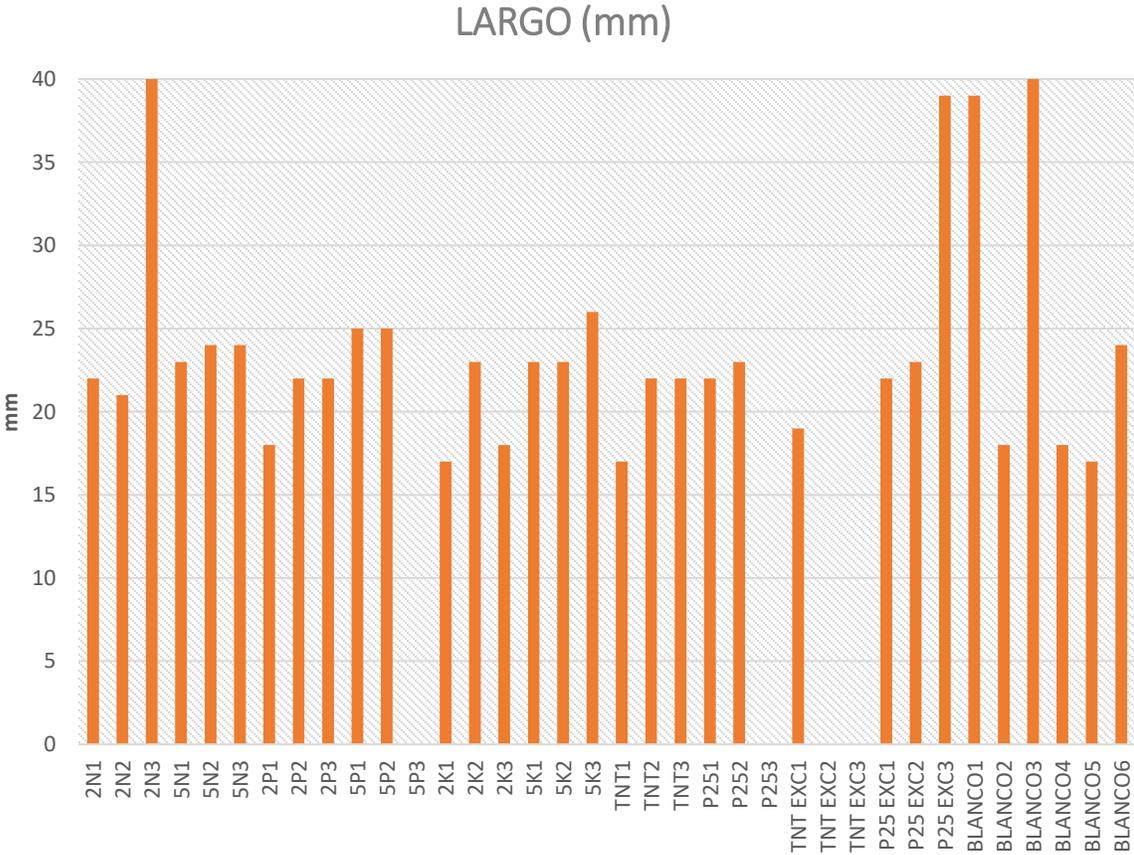


Imagen 18) Largo del tallo de las plántulas de chile en espuma fenólica (prueba 2) al día 15

El porcentaje de semillas anormales para las semillas de la prueba 2:

$$\frac{10 \text{ semillas anormales}}{32 \text{ semillas germinadas}} \times 100 = 31.25\%$$

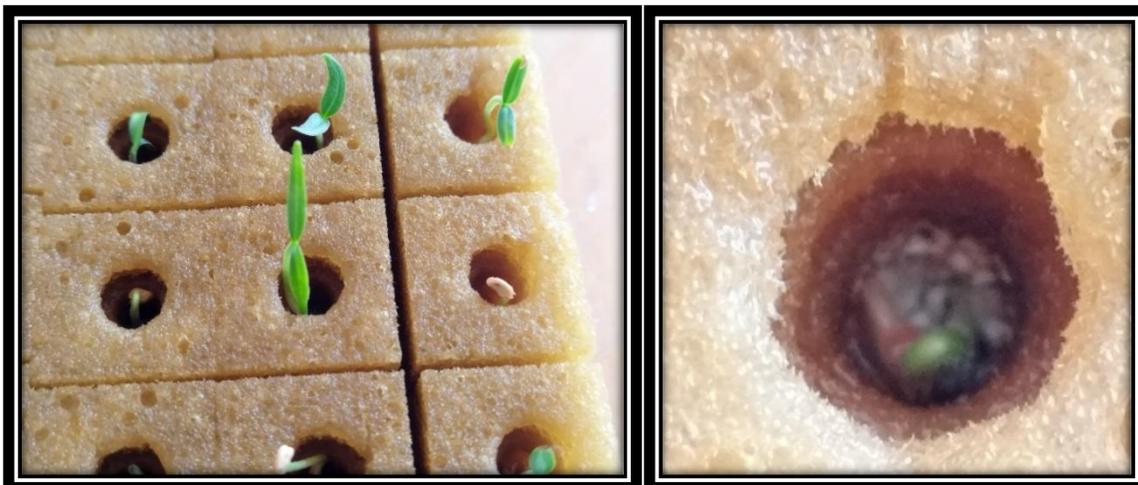


Imagen 19a) Plántulas normales. **19b)** anormlaes en espuma fenólica (prueba 2)

Al observar los datos de la germinación y el largo del tallo en relación con los diferentes materiales utilizados, se puede concluir que el exceso de TNT y las semillas en contacto con nanopartículas dopadas con 5% de potasio y P25 presentaron un retraso notable en la germinación. Estos materiales parecen afectar negativamente la velocidad de germinación de las semillas.

Por otro lado, se observó que los grupos de control, es decir, aquellos en los que no se utilizó ningún material adicional, mostraron una mayor tasa de germinación y un mayor largo del tallo. Esto sugiere que la ausencia de materiales adicionales puede favorecer el proceso de germinación y el crecimiento longitudinal de las plántulas.

Además, se encontró que los materiales dopados con 2% de nitrógeno (2%N), 5%N, 2% de fósforo (2%P), 2% de potasio (2%K), 5%K, TNT y P25 en exceso también mostraron un aumento en la tasa de germinación y en el largo del tallo. Estos resultados indican que estos materiales pueden tener un impacto positivo en el crecimiento de las plántulas.

En resumen, el exceso de TNT y las nanopartículas dopadas con 5% de potasio y P25 se asociaron con una germinación más lenta, mientras que los grupos de control y los materiales dopados con diferentes porcentajes de nutrientes mostraron una mayor tasa de germinación y un mayor crecimiento del tallo.

7.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR ESPECTROSCOPIA UV-VIS

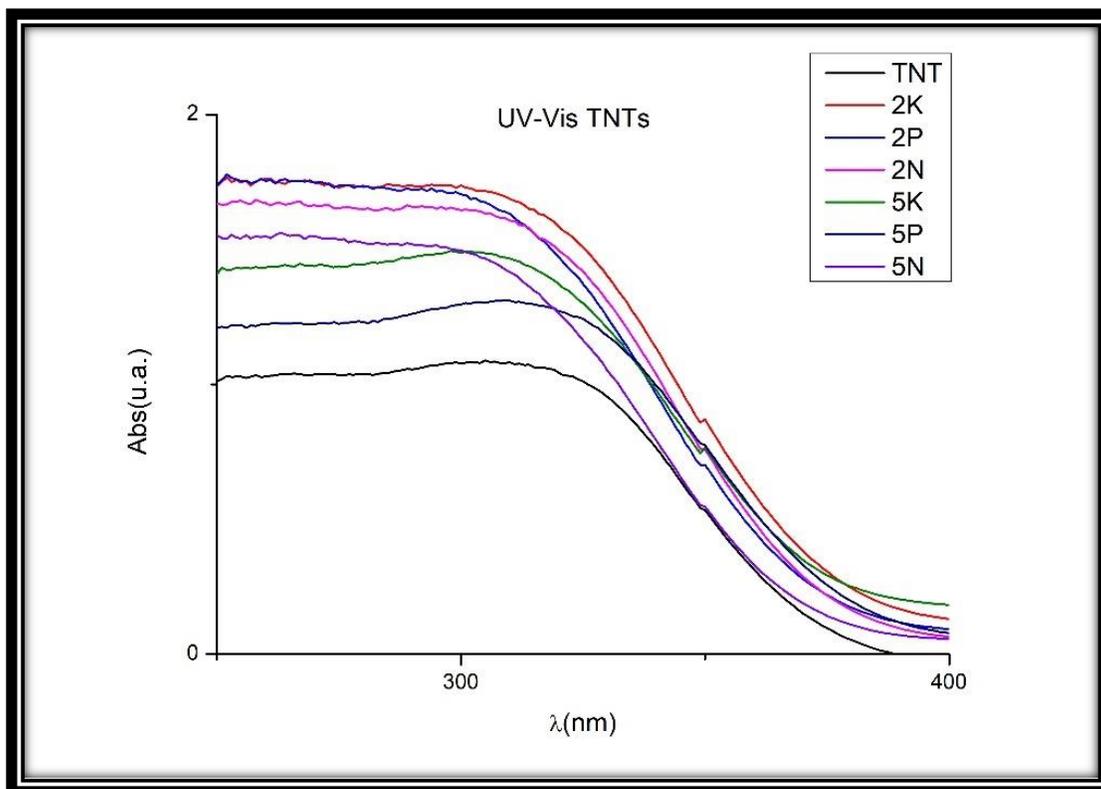


Imagen 20) Espectro UV-Vis de TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.

Los espectros UV-Vis de los nanotubos mostraron la banda de absorción cercana a los 325 nm (imagen 20), lo cual nos confirma la presencia del TiO_2 al ser característica esta absorción de la fase anatasa. Por el modelo de Kubelka-Munk (imagen 21) se obtuvo la energía de banda prohibida (E_g) (Tabla 4) dándonos valores superiores al obtenido para el TiO_2 de 3.25 eV. El material que registró un menor valor fue el TNT 5%P, sin embargo; concluimos que todos los materiales utilizados para que funcionen como material fotocatalítico deberán ser irradiados por luz en el rango ultravioleta.

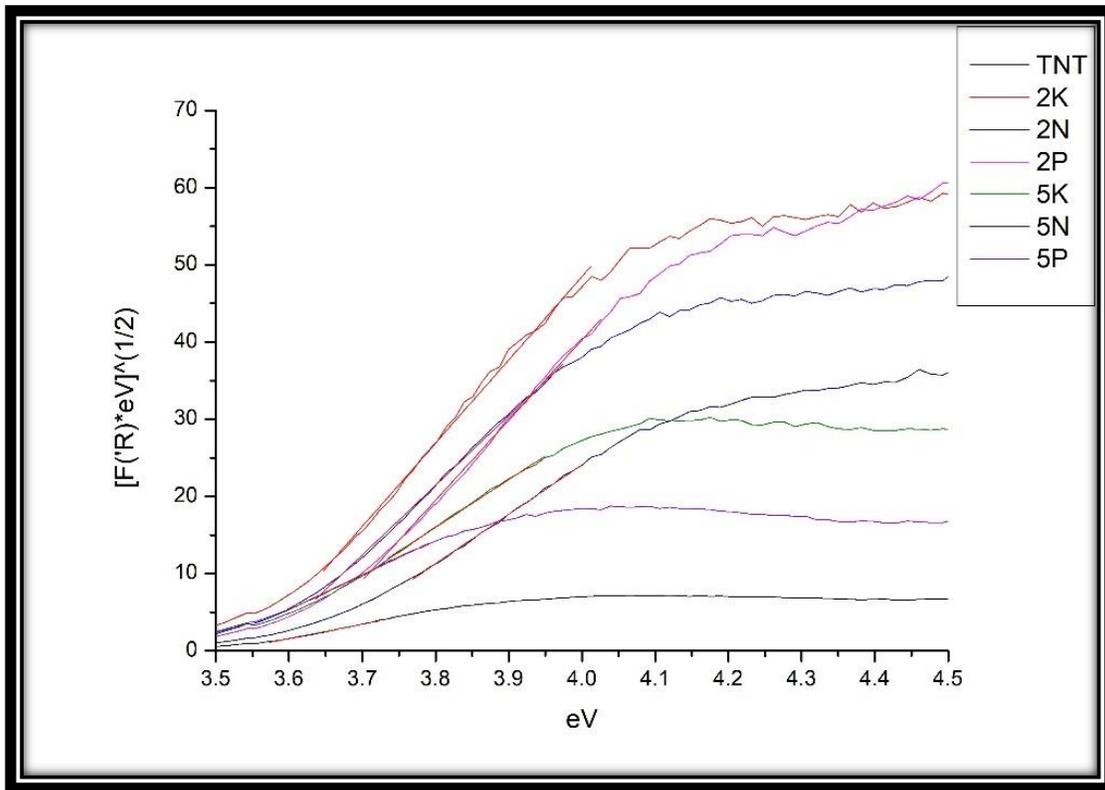


Imagen 21) Espectro UV-Vis de energía de banda prohibida de TNT-X% sintetizados por el método hidrotermal.

Tabla 4. Energía de banda prohibida (E_g) de los TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.

Material	E_g (eV)
TNT	3.51
2N	3.56
2P	3.61
2K	3.55
5N	3.62
5P	3.48
5K	3.54

7.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR ESPECTROSCOPIA FTIR

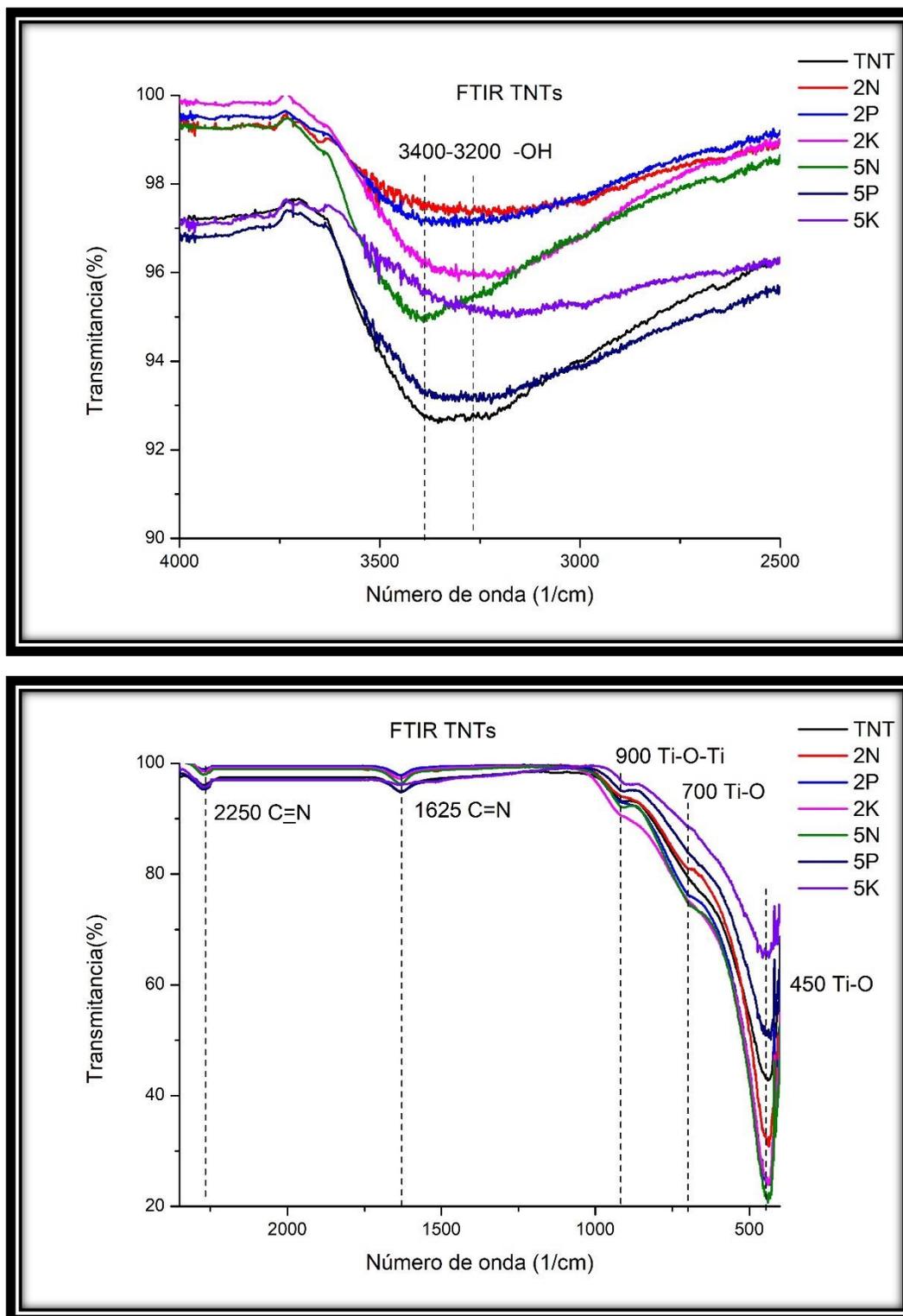
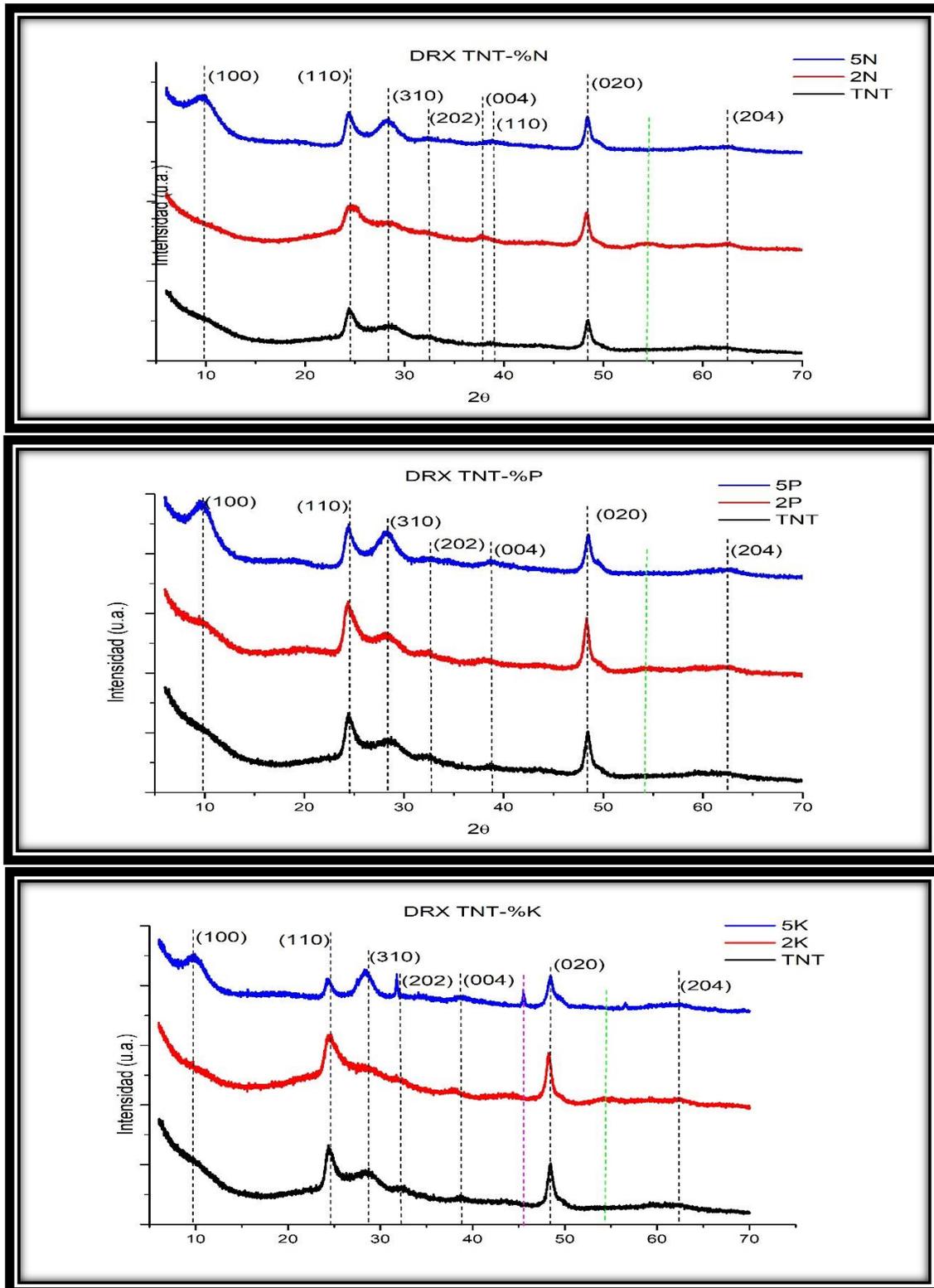


Imagen 22a-b) Espectro FTIR de TNT-X%, sintetizados por el método hidrotermal.

Como se muestra en la imagen 22 todos los materiales presentan las mismas bandas, con un ligero corrimiento en los espectros de TNT, TNT-5%P y TNT-5%K. Se pueden observar la presencia de bandas en 3400 cm^{-1} las cuales normalmente corresponde a la vibración de estiramiento del enlace O-H (hidroxilo) presentes en el agua. A 2350 cm^{-1} se observa la presencia de un pico negativo, lo que puede indicar una disminución en la transmisión de energía en una región específica del espectro infrarrojo. Esto puede deberse a diferentes fenómenos, como absorción, reflexión o dispersión de la energía infrarroja por parte de las moléculas presentes en la muestra. Alrededor de los 2300 cm^{-1} se observa la presencia de la vibración del triple enlace de carbono y nitrógeno ($\text{C}\equiv\text{N}$), a 1600 cm^{-1} se encuentran bandas que comúnmente se atribuyen a la vibración de estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) y finalmente la banda en 850 cm^{-1} puede estar relacionada con la vibración de flexión del enlace de C-H adyacente al enlace triple ($\text{R}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$). Todos estos enlaces anteriormente mencionados son característicos de la estructura de los TNT dopados.

7.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X



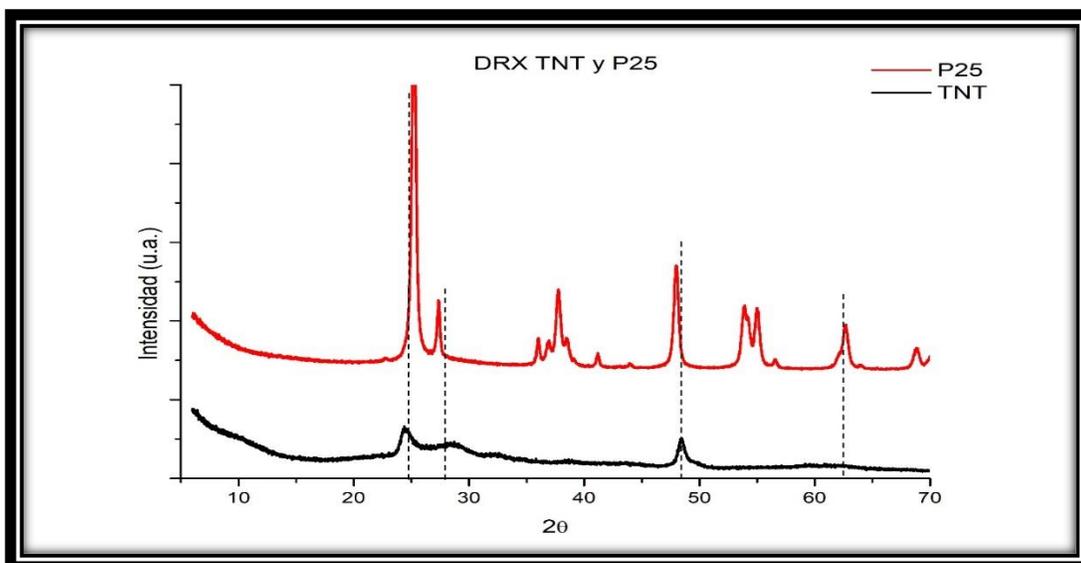


Imagen 23. Patrón de difracción de rayos x de **a)** TNT, TNT 2%N, TNT 5%N, **b)** TNT, TNT 2%P, TNT 5%P, **c)** TNT, TNT 2%K, TNT 5%K y **d)** TNT y P25 sintetizados por el método hidrotermal.

Se utilizó la técnica de difracción de rayos X para identificar las fases cristalinas presentes. En la imagen 23 se muestran los difractogramas correspondientes a los materiales analizados. Todos ellos muestran la presencia de la fase cristalina monoclinica $H_2Ti_3O_7$ (JCPDS 36-054), evidenciada por la presencia de picos localizados a 24° (110), 28° (310) y 48.4° (020) en 2θ . Además, se encontró la presencia de la fase cristalina anatasa (JCPDS 21-1272), donde se observaron picos a 32.5° (202), 37.3° (004) y 62.2° (204). Finalmente, en los materiales dopados con nitrógeno se encontró la presencia de la fase cristalina rutilo (JCPDS 21-1276) donde se detectó un pico a 39° (110).

Se detectó un pico nuevo alrededor de los 54° (línea punteada verde) en los 3 materiales dopados al 2% el cual no se presencié en los materiales dopados al 5% lo cual indica que el porcentaje del dopaje va cambiando la estructura de los titanatos. Para el caso del material dopado al 5%K se encontró un pico cerca de los 46° (línea punteada magenta, imagen 23c), de igual manera se observó un aumento en la intensidad en algunos picos entre los diferentes difractogramas, lo cual puede atribuirse a modificaciones en la estructura de los titanatos.

7.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES POR FISISORCIÓN DE NITRÓGENO

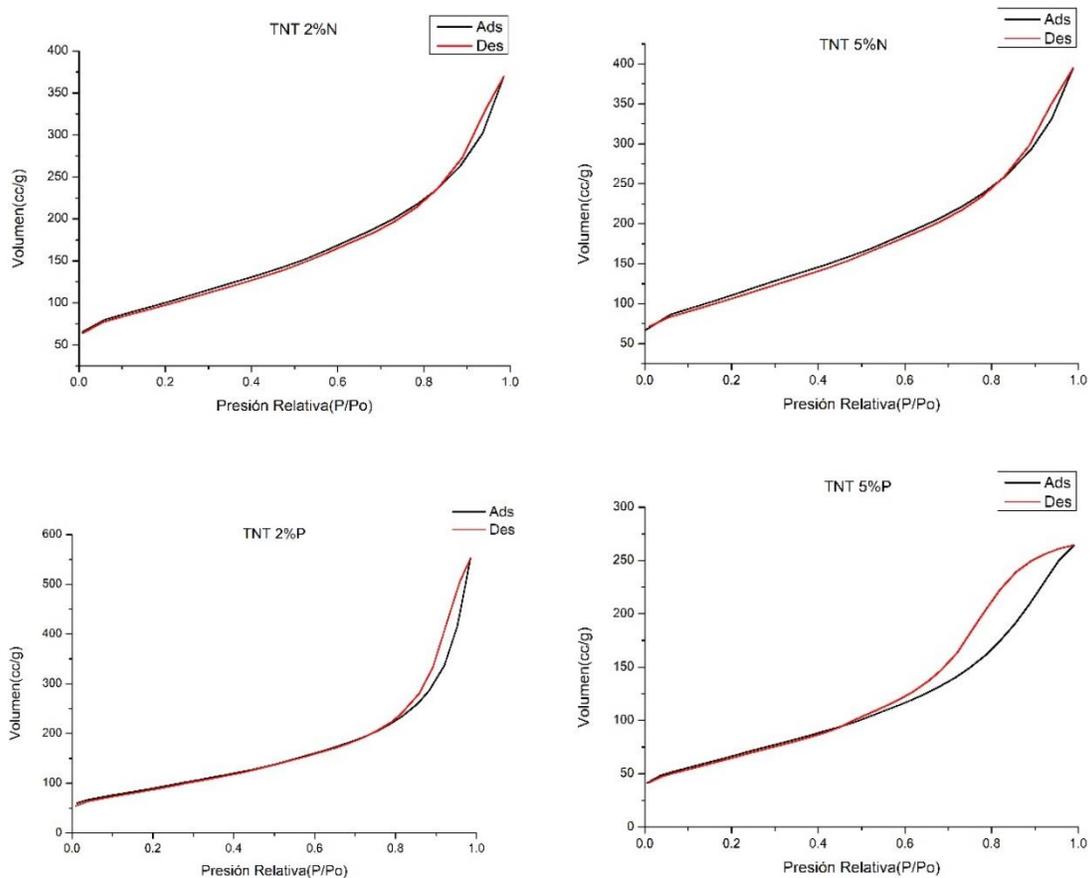


Imagen 24. se muestran las isothermas de adsorción (rojo) y desorción (azul) de los materiales **a) TNT-2%N, b) TNT-5%N, c) TNT-2%P, d) TNT-5%P**

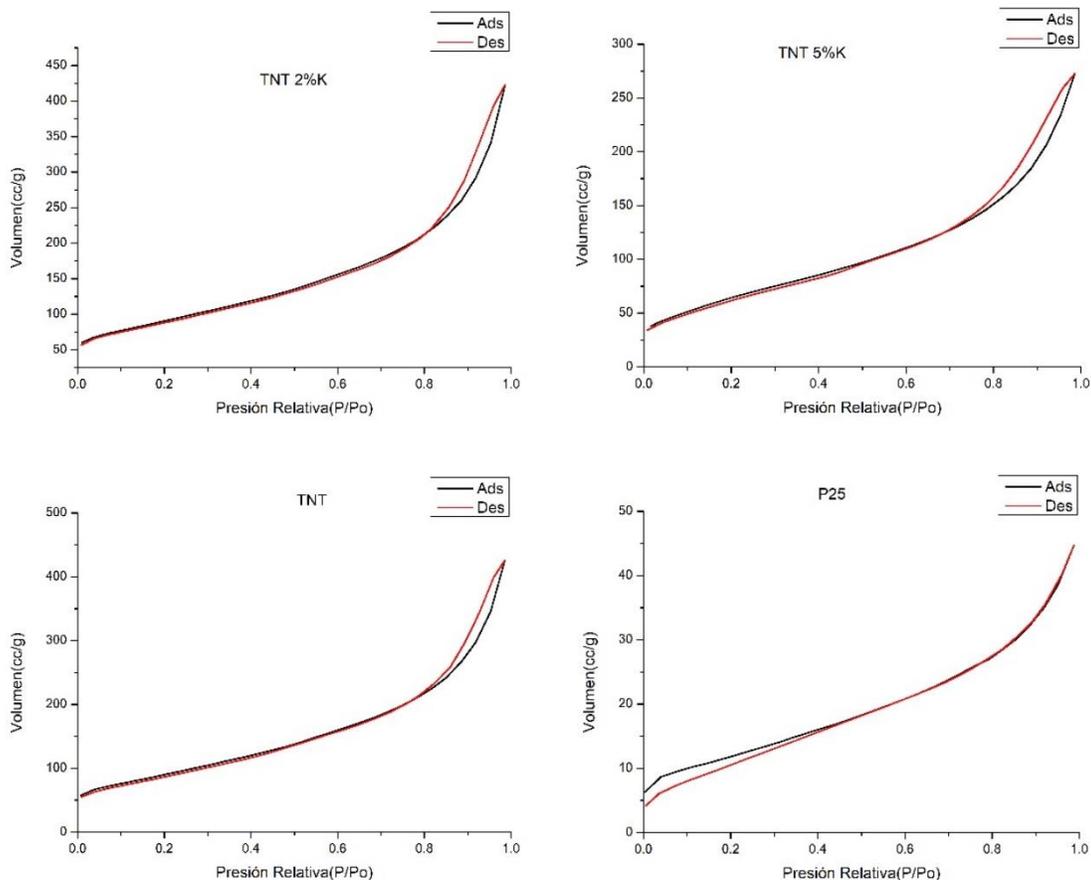


Imagen 25. se muestran las isothermas de adsorción (rojo) y desorción (azul) de los materiales a) TNT-2%K, b) TNT-5%K, c) TNT, d) P25

Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis de fisorción de Nitrógeno de los TNT-X%, sintetizados por el método hidrotetmal.

	2%N	5%N	2%P	5%P	2%K	5%K	TNT	P25
Tipo de isoterma	IV	IV						
Volumen de poro (cc/g)	0.48	0.51	0.80	0.38	0.58	0.37	0.59	0.05
Área superficial (m²/g)	358.71	400.16	327.99	242.77	325.68	243.23	326.82	43.37
Radio de poro (Å)	20.12	20.05	17.24	18.58	18.58	18.72	18.64	15.91

Las conclusiones obtenidas por el análisis de los datos representados en la tabla 5 son por su tipo de isoterma, los materiales son porosos, conformados por multicapas, ya que todas las isotermas fueron tipo IV que indica la presencia de una estructura porosa con poros de tamaño moderado a grande y una distribución amplia de tamaños de poro, es típico de materiales con estructuras de poros heterogéneos o también por una adsorción física en multicapas pero donde la constante de equilibrio de formación de la primera capa es igual que para las siguientes (no se observa diferencia entre el llenado de la primera capa y del resto). La diferencia más notable entre las isotermas es el ancho del ciclo de histéresis (las curvas de adsorción y desorción difieren como se puede observar en las imágenes 24 y 25). El ciclo de histéresis es debido a la condensación por la forma irregular de los capilares. El proceso de desorción no es de equilibrio mientras que el de adsorción si, de ahí la histéresis.

Se observa un claro aumento de área superficial, atribuido al porcentaje de dopaje de los materiales, dejando en claro que el dopaje con N proporciona una mayor área superficial al material. Y por el tipo de isoterma se ve una similitud entre el material de TNT y los dopados, lo cual sugiere un cambio menor entre las propiedades del TNT y los materiales dopados.

7.8 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS POR ESPECTROSCOPIA UV-VIS

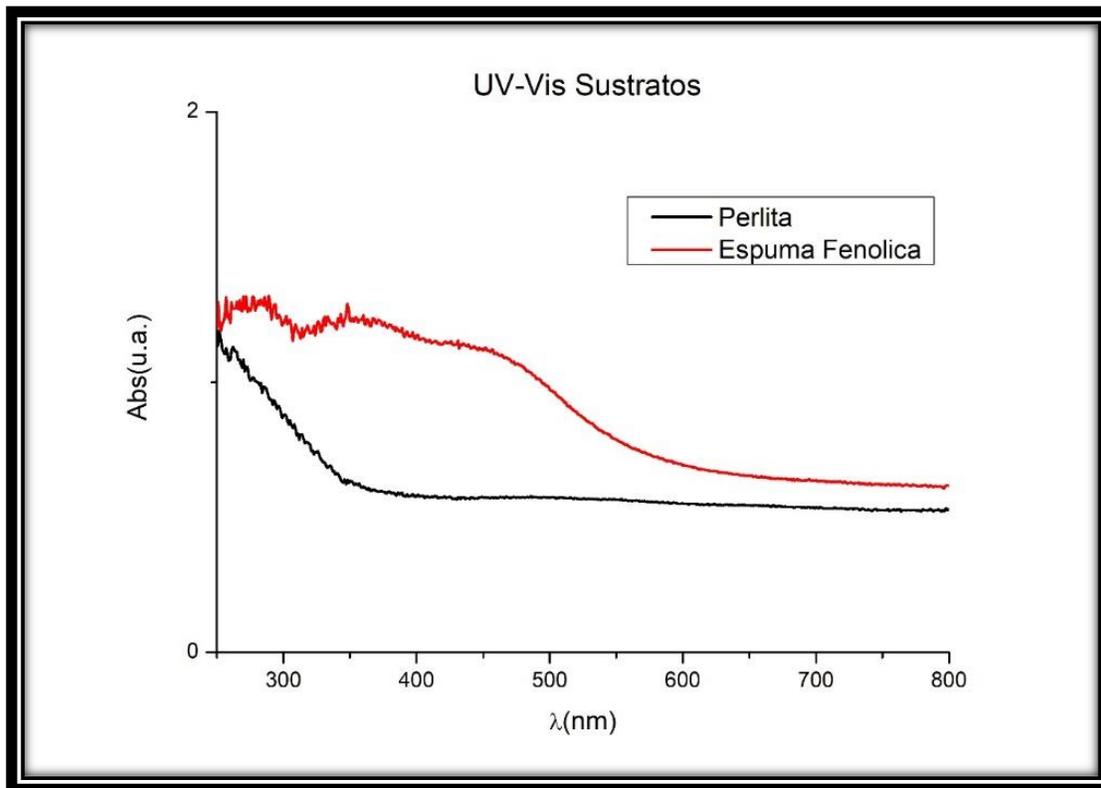


Imagen 26) Espectro UV-Vis de ambos sustratos utilizados.

Los espectros UV-Vis de los sustratos (imagen 26), en el caso de la espuma fenólica mostró bandas de absorción alrededor de los 285 nm, 380 nm y una última a los 475 nm los cuales son característicos de los fenoles. Para la perlita observamos que no se encuentra una señal específica, pero podemos identificar esa caída en los desde los 200 a los 350 nm, que es algo común en el dióxido de silicio (SiO_2).

7.9 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS POR ESPECTROSCOPIA FTIR

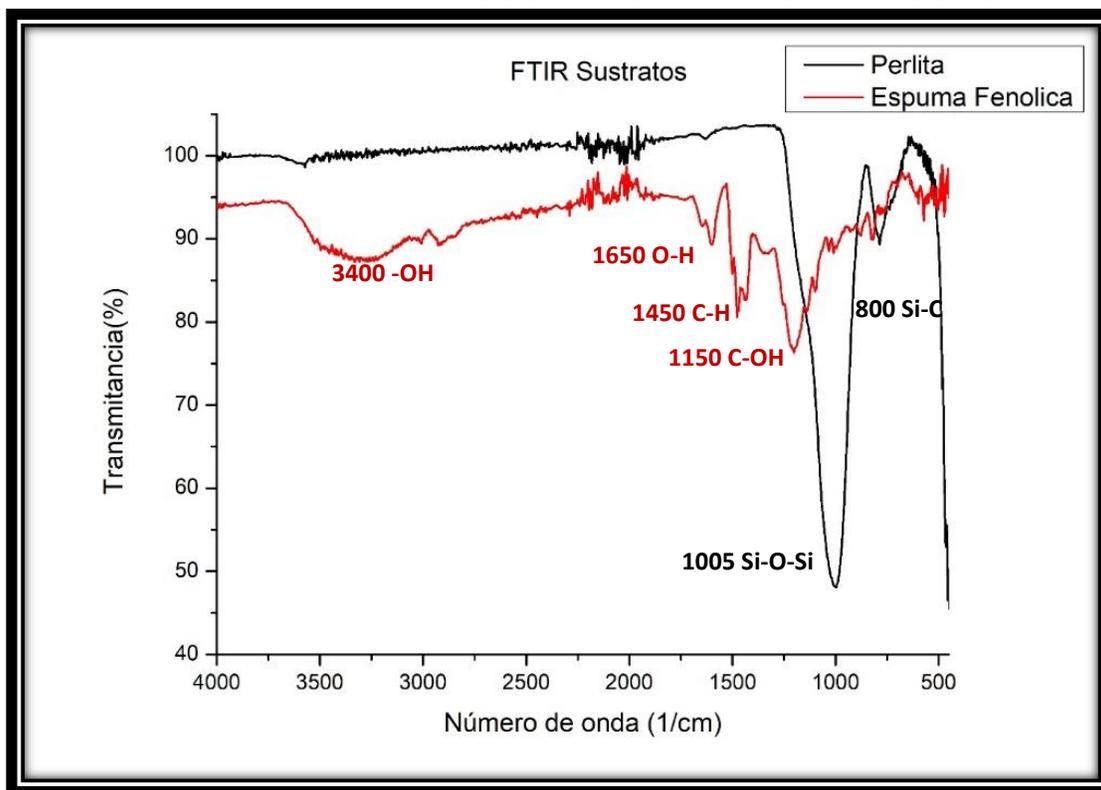


Imagen 27) Espectro FTIR de ambos sustratos utilizados

Como se muestra en la imagen 27, para la espuma fenólica se pueden observar la presencia de una banda ancha a los 3300 cm^{-1} corresponde a la vibración de estiramiento del enlace entre el C-OH presentes por el hidrógeno intramolecular de los fenoles. Se presentan varias bandas de los 1700 a los 500 cm^{-1} , las más características en el espectro presentado son la de 1650 cm^{-1} que es la banda que corresponde a la flexión del enlace oxígeno-hidrógeno (O-H) presente en el grupo fenol. La segunda es la banda de los 1450 cm^{-1} que corresponde a las vibraciones de estiramiento del anillo aromático presente en los fenoles. La tercera está a los 1150 cm^{-1} propia de la vibración de estiramiento del enlace C-O en el grupo fenol.

Para la perlita vemos 2 bandas largas, la primera en 1005 cm^{-1} la cual es propia de la vibración de estiramiento del enlace entre el Si-C. La segunda a 800 cm^{-1} la cual se adjudican a la vibración de estiramiento del enlace del silicio con el oxígeno Si-O-Si.

Es muy visible en ambos espectros una zona con ruido de los 2250 a los 1850 cm^{-1} , la cuál es causada por el equipo utilizado.

7.10 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL TNT DESPUÉS DE SU USO POR ESPECTROSCOPIA FTIR

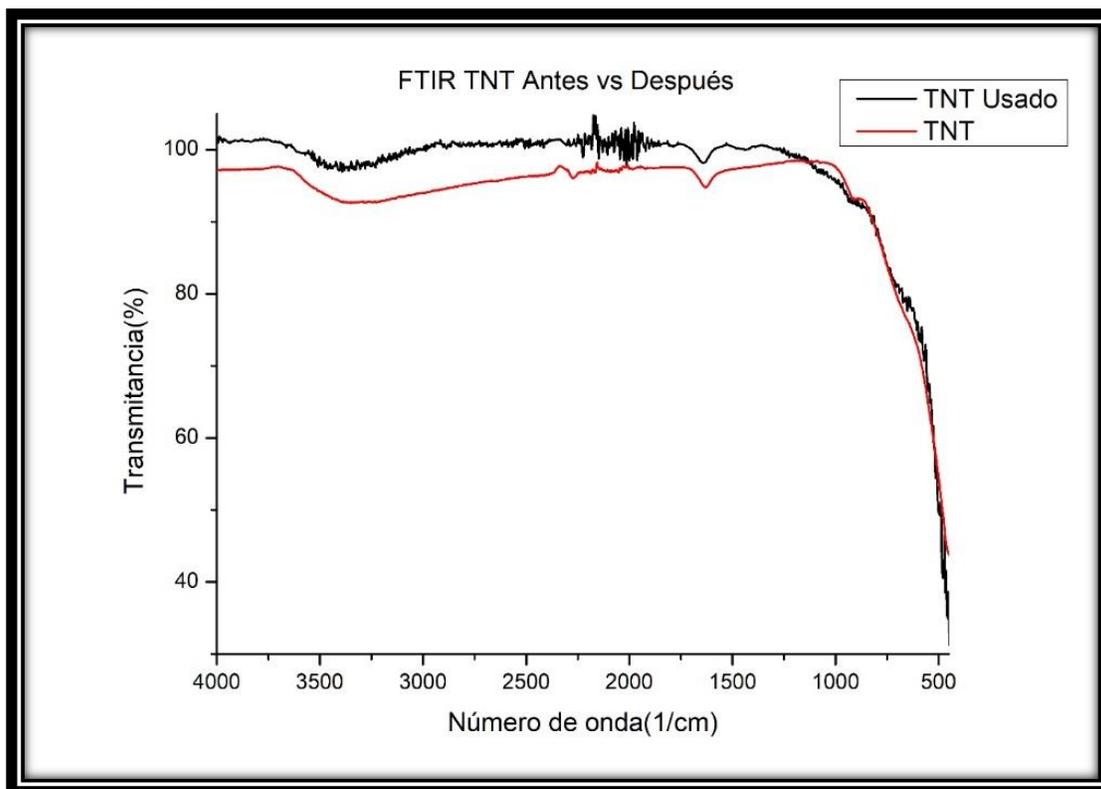


Imagen 28) Espectro FTIR de TNT antes y después de un uso.

La imagen 28 muestra que las bandas presentes en el material, específicamente en los titanatos sin dopar, son las mismas con un ligero corrimiento. Esto sugiere que, al menos en el primer uso, el material no experimenta cambios estructurales significativos. La falta de cambios en las bandas indica que la estructura cristalina del material se mantiene estable y no se produce una reorganización molecular significativa.

8. Conclusiones

En conclusión, se sintetizaron materiales mediante el método hidrotermal con fases de titanato monoclinico ($H_2Ti_3O_7$) y anatasa predominantes.

Se encontró que los materiales dopados con nitrógeno (N) presentaban ventajas significativas. Estos materiales mostraron un área superficial más amplia y lograron una tasa de germinación del 100% en ambos sustratos cuando se doparon con un 2% de N. Además, se observaron registros de tamaño positivos, lo que indica un crecimiento favorable de las plántulas.

Es importante destacar que se encontró una dependencia del sustrato utilizado. La espuma fenólica proporcionó un mayor espacio para el crecimiento de las raíces, así como una mayor absorción de agua y retención de humedad, lo que resultó en un mejor crecimiento de las plántulas. Sin embargo, no fue posible medir las raíces en la prueba con espuma fenólica, lo que limita la interpretación de los resultados.

En las pruebas con perlita, se observó estrés en las plantas y las raíces debido al espacio reducido del recipiente utilizado para la germinación.

A simple vista, no se detectó la presencia de patógenos, lo cual se atribuye posiblemente al uso de luz LED, que puede haber motivado la actividad fotocatalítica del material y prevenir la proliferación de patógenos.

En general, se identifica una buena oportunidad para mejorar el dopaje del material con N hasta alcanzar el nivel óptimo para la germinación del chile serrano. Esto puede proporcionar beneficios adicionales y promover un crecimiento saludable de las plántulas.

Referencias bibliográficas

- [1] V. Rodríguez-González et al. (2019). Applications of photocatalytic titanium dioxide-based nanomaterials in sustainable agriculture. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 40, 49–67.
- [2] R. H. Lira-Saldivar. Departamento de Plásticos en la Agricultura, CONACYT-CIQA (2016)
- [3] Lv, J., Zhang, Y., Xu, H., Yu, M., Chen, J., Yang, Z., ... & Sun, J. (2019). Environmental implications of nanomaterials: A review focusing on their fate and toxicity in wastewater treatment processes. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 41-59.
- [4] Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35, 64-70.
- [5] Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, Nano-guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(7), 1447-1483.
- [6] Chemical Safety Facts. (2022, October 14). Dióxido de titanio. Recuperado de <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/dioxido-de-titanio/>
- [7] Dubed Bandomo, G. C. (2017). Síntesis y caracterización fisicoquímica y fotoelectroquímica de membranas de nanotubos de TiO₂ (MNTsTiO₂) modificadas con materiales electrocatalíticos. (Tesis de maestría). Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
- [8] Vargas, Y., Obaya Valdivia, A. E., Vargas Rodríguez, G. I., Gómez-Vidales, V., Chávez Carvayar, J. A., & García Bórquez, A. (2013). Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores. *Revista Digital Universitaria*, 14(5), 1 de mayo de 2013.
- [9] Vargas Urbano, M. A., Ochoa Muñoz, Y. H., Ortigón Fernández, Y., Mosquera, P., Rodríguez Páez, J. E., & Camargo Amado, R. J. (2011).

Nanoparticles of TiO₂, anatase phase, synthesized by chemical methods. *Ingeniería y desarrollo*, 29(2), Julio-diciembre, 2011.

- [10] Betancur Henao, C. P., Hernández Montes, V., & Buitrago Sierra, R. (2016). Nanoparticles for antibacterial materials and titanium dioxide applications. *Revista Cubana Invest Bioméd*, 35(4), Ciudad de la Habana, oct.-dic. 2016.
- [11] López Serna, D. (2015). Foto-oxidación de bisfenol A bajo la acción de luz visible. El monitoreo de oxígeno disuelto como evidencia de la degradación. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil.
- [12] Hernández Enríquez, J. M., García Serrano, L. A., Zeifert Soares, B. H., García Alamilla, R., Zermeño Resendiz, B. B., Del Angel Sánchez, T., & Cueto Hernández, A. (2008). Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de N-TiO₂ - Anatasa. *Superficies y Vacío*, 21(4), 1-5.
- [13] B. Nuñez Luna, B. P. (2018). Nanoestructuras de NPsAg/TNT y Ag₃PO₄/TNT como alternativa para la degradación de contaminantes y como agentes microbicidas. (tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Departamento de materiales Avanzados.
- [14] Del Ángel Sanchez, K. (2014). SINTESIS DE MATERIALES ACTIVOS EN LUZ VISIBLE TiO₂ DOPADO CON NITROGENO PARA DEGRADAR COMPUESTOS ORGÁNICOS. (Tesis de doctorado). Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- [15] Villa Gómez, K. (2010). Uso de TiO₂ dopado con nitrógeno para la generación de hidrógeno bajo irradiación con luz visible. (Tesis de maestría). Facultad de Ciencias, Departamento de Química.
- [16] Gogos, A., & Knauer, K. (2015). Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(39), 9,947-9,963.

- [17] DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, 5(2), 91-94.
- [18] Tripathi, D. K., Tripathi, A., Singh, S., Singh, Y., Vishwakarma, K., Yadav, G., & Sharma, S. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2-12.
- [19] Khodakovskaya, M. V., Kim, B. S., Kim, J. N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., & Mustafa, T. (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: Effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, 9(1), 115-123.
- [20] Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2018). Nanofertilizers: New products for the industry? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5867-5873.
- [21] Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M. G. H., & Saradhi, P. P. (2016). Silver nanoparticles induced alterations in multiple cellular targets, which are critical for drug susceptibilities and pathogenicity in fungal pathogen (*Candida albicans*). *International Journal of Nanomedicine*, 11, 525-536.
- [22] Saranraj, P., Geetha, N., & Priyadharsini, P. (2019). Application of nanotechnology in agriculture: Review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 7(1), 477-481.
- [23] Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35, 64-70.
- [24] Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A., Bucheli, T. D., & Gustafsson, J. P. (2018). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology*, 13(8), 677-684.
- [25] Dhankhar, R., Hooda, A., Jhajharia, S., & Dahiya, P. (2021). Role of nanotechnology in agriculture: A systematic review. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(7), 875-890.

- [26] Elmer, W. H., & White, J. C. (2016). The future of nanotechnology in crop protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(48), 9,887-9,905.
- [27] Rai, M., Ingle, A., & Paralikar, P. (2019). Nanotechnology in agriculture: Challenges and prospects. *Frontiers*
- [28] AFEPADI Asociación de las empresas de dietéticos y complementos alimenticios.(2019, May 10). Dióxido de titanio. Cronología de un aditivo alimentario con un futuro incierto. Recuperado de <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/dioxido-de-titanio/>
- [29] <http://www.afepadi.org/index.php/component/k2/item/450-dioxido-de-titanio-cronologia-de-un-aditivo-alimentario-en-stand-by>
- [30] Etacheri, V., Di Valentin, C., Schneider, J., Bahnemann, D., & Pillai, S. C. (2015). Visible-light activation of TiO₂ photocatalysts: Advances in theory and experiments. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 25, 1-29.
- [31] Martínez Rodríguez, L. A. (2015). Micromorfología de Tallo y Raíz de Plantas de Maíz y Frijol Tratadas con Nanopartículas de Titanio, Hierro y Zinc, Bajo Invernadero. (Tesis de ingeniero en agrobiología). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Agronomía, Departamento de Botánica. Saltillo, Coahuila, México.
- [32] Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018 <http://www.fao.org/home/es/>
- [33] Menard, A., Drobne, D., & Jemec, A. (2011). Ecotoxicity of nanosized TiO₂: Review of in vivo data. *Environmental Pollution*, 159(3), 677-684.
- [34] Suriyawong, P., Rattanarat, P., Thuptimdang, P., & Sarmah, A. K. (2021). Titanium dioxide nanoparticles: An emerging tool for agricultural pest management. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123425.
- [35] Liu, J., Wang, X., Xue, Y., Zhang, B., & Feng, Y. (2018). TiO₂ nanoparticles in the terrestrial environment: Effects on soil microorganisms, plants, and ecosystem health. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), 19,155-19,172.

- [36] Geisler-Lee, J., Wang, Q., Yao, Y., Zhang, W., & Geisler, M. (2013). Phytotoxicity, accumulation and transport of silver nanoparticles by *Arabidopsis thaliana*. *Nanotoxicology*, 7(3), 323-337.
- [37] Sun, H., Li, B., Wang, S., Jin, C., Yu, C. P., & Chen, Z. (2017). Transport of TiO₂ nanoparticles in saturated porous media: Effects of ionic strength, pH, and flow rate. *Environmental Pollution*, 224, 96-103.
- [38] Zhang, M., Xie, C., Zhang, Y., Wang, H., Chen, Y., & Zhou, Q. (2018). Effects of titanium dioxide nanoparticles on growth and metabolism of three terrestrial plants. *Environmental Pollution*, 237, 126-133.
- [39] Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic Press.
- [40] White, P. J., & Broadley, M. R. (2012). Physiological and molecular aspects of nutrient acquisition by plants. In *Annual Plant Reviews Volume 42: Nitrogen Metabolism in Plants in the Post-genomic Era* (pp. 1-35). Wiley.
- [41] Taiz, L., & Zeiger, E. (2014). *Plant physiology* (6th ed.). Sinauer Associates.
- [42] Marschner, H. (2011). *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- [43] Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2), 173-195.
- [44] Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th ed.). Kluwer Academic Publishers.
- [45] Schachtman, D. P., Reid, R. J., & Ayling, S. M. (1998). Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology*, 116(2), 447-453.
- [46] Lynch, J. P., & Brown, K. M. (2001). Topsoil foraging - An architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant and Soil*, 237(2), 225-237.
- [47] Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D., & Havlin, J. L. (1993). *Soil fertility and fertilizers* (5th ed.). Macmillan Publishing Company.

- [48] Epstein, E. (1972). Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. Wiley-Interscience.
- [49] INTRAGI Aguayo Rivera A. (2012) Cultivo de Chile en México. Recuperado de <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/cultivo-de-chile-en-mexico>
- [50] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2019) Desarrolla Inifap híbrido de chile serrano mejorado que reduce tiempo de cosecha. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/developa-inifap-hibrido-de-chile-serrano-mejorado-que-reduce-tiempo-de-cosecha-211389#:~:text=Se%20produce%20de%2015%20a,por%20ciento%20de%20mayor%20rendimiento.>
- [51] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2003) El cultivo de chile serrano en la zona media de San Luis Potosí. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/66152/MC_chilserra_s_eptiembre_2015.pdf
- [52] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2015) Márgenes de comercialización Chile Serrano. Recuperado de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/125.pdf>
- [53] Representación AGRICULTURA San Luis Potosí (2021) San Luis Potosí productor de chile verde. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/sanluispotosi/es/articulos/san-luis-potosi-productor-de-chile-verde?idiom=es>
- [54] El economista (2019). San Luis Potosí se posiciona como cuarto productor nacional de chile verde. Recuperado de <https://www.economista.com.mx/estados/San-Luis-Potosi-se-posiciona-como-cuarto-productor-nacional-de-chile-verde-20190220-0154.html>
- [55] Vegetables Bayer (2019). Conoce y controla las tres enfermedades más comunes en los chiles jalapeños. Recuperado de <https://www.vegetables.bayer.com/mx/es-mx/recursos/noticias/conoce->

y-controla-las-tres-enfermedades-mas-comunes-en-los-chiles-jalapenos.html

- [56] W. Díaz et al. Journal Manager (1875) GEOGRAFÍA MÉDICA DE CHILE – Enfermedades reinantes en Chile.
- [57] Rivas Ramírez, L. K. (2021). Manejo del TMV (virus mosaico del tabaco) en *Capsicum annum* L. con nanopartículas de ZnO. (Tesis de maestría). Maestría en Ingeniería en Biosistemas, Universidad Autónoma de Querétaro.
- [58] Gordillo-Delgado, Fernando; Zuluaga-Acosta, Jakeline; Marín-Gallego, Benyi (2019). Inoculación de nanopartículas de TiO₂-Ag en semillas de espinaca. *Informador Técnico*, 83(1), 76-85.
- [59] Sunada, K., Watanabe, T., Hashimoto, K., & Fujishima, A. (2008). Bactericidal activity of copper-deposited TiO₂ thin film under weak UV light illumination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 4819-4824.
- [60] Burke, D., Wezel, A., Duncan, A., & Gardi, C. (2014). Impact of organic inputs on greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Europe. *Biology and Fertility of Soils*, 50(7), 1169-1173.
- [61] Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- [62] Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.
- [63] Lal, R. (2020). *Soil Physics: Sustainable Agriculture and Environmental Management* (4th ed.). CRC Press.
- [64] Alarcón-Corredor, O. M., Bautista-Baños, S., Guerrero-Prieto, V. M., & Rodríguez-González, A. (2017). Uso de nanopartículas para mejorar la producción de chile jalapeño (*Capsicum annum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1,051-1,062.

- [65] López-Pérez, D. A., Ochoa-Alejo, N., & Rivera-Bustamante, R. F. (2015). Nanoparticles in chili pepper: Understanding the uptake and translocation of nanoparticles in plants. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-8.
- [66] Carrillo-López, A., Gómez-Merino, F. C., & Martínez-Estévez, M. (2018). Nanoparticles as elicitors of plant responses in chili pepper (*Capsicum annuum* L.): A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(3), 560-573.
- [67] Elmer, W. H., & White, J. C. (2016). The future of nanotechnology in crop protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(48), 9,887-9,905.
- [68] Hernández-Montoya, V., Ortiz-López, A., Rascon-Chu, A., Ruiz-Espinosa, H., García-Casillas, P. E., Silva-Beltrán, N. P., & Delgado-Vargas, F. (2019). Chitosan nanoparticles enhance bioactive compounds and quality attributes of chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, 279, 315-321.
- [69] Manzano-Sánchez, J., Casarrubias-Castillo, K., Zavala-Padilla, G., Contreras-Cornejo, H. A., & Orozco-Mosqueda, M. D. C. (2020). Nanoparticles as potential biotechnological tools for the improvement of chili pepper (*Capsicum* spp.). *Molecules*, 25(2), 379.
- [70] Torres, I. F., Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., & López-Bucio, J. (2016). *Trichoderma* spp. Improve growth of chili pepper plants (*Capsicum annuum*) under chilling stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3), 483-492.
- [71] Ramírez-Guzmán, N. E., Jasso-Cantú, D., Hernández-Montoya, V., Ponce-Vargas, M., & Pérez-Alonso, C. (2016). Optimization of chitosan nanoparticles for the encapsulation of chili pepper (*Capsicum annuum* L.) oleoresin. *Food Hydrocolloids*, 58, 135-141.
- [72] Hernández-Montoya, V., Rascon-Chu, A., Silva-Beltrán, N. P., & Delgado-Vargas, F. (2016). Microencapsulation of chili pepper

- (*Capsicum annum* L.) oleoresin by spray drying using different wall materials. *Food Research International*, 89, 1024-1032.
- [73] Jiménez, M. S., & Bueso, F. (2017). Germination substrates for horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 216, 124-132.
- [74] Nascimento, W. M., & Souza, R. P. (2020). Seedling substrates for vegetable crops: A review. *Scientia Agricola*, 77(1), e20180371.
- [75] Fernández-Hernández, A., López-Cervantes, L., Salinas-González, H., & Ruiz-Sánchez, E. (2018). Sustratos orgánicos para la producción de plántulas hortícolas en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 24(2), 91-104.
- [76] González-Díaz, P., Freitas, R., Sánchez-Girón, V., & Regalado-González, C. (2020). Germination and seedling growth of vegetable species under different substrates. *Horticultura Brasileira*, 38(2), 166-172.
- [77] Gutiérrez, E., Hernández, A., Blanco-Macías, F., & Fernández, M. D. (2016). Effect of different substrates on the growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants during the nursery stage. *Acta Agronómica*, 65(1), 17-25.
- [78] Chen, W., & Huang, W. (2018). Use of perlite as a lightweight aggregate in mortars. *Construction and Building Materials*, 183, 384-391.
- [79] Alabadi, A., Font, R., & Gea, G. (2014). Thermal degradation and kinetic analysis of perlite residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 245-251.
- [80] Duran Ata, N., Gunes, E., & Ozbey, M. (2017). Investigation of perlite thermal insulation mortar's properties with waste powdered egg shell additive. *Construction and Building Materials*, 135, 491-498.
- [81] Shaviv, A. (2005). Advances in controlled-release fertilizers. *Advances in Agronomy*, 85, 1-59.
- [82] Ozyazıcı, M. A., & Karagüzel, R. (2021). Investigation of the usability of perlite, vermiculite, and pumice wastes as a supplementary

cementitious material in cementitious composites. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124327.

- [83] Zhang, J., & Zhao, Z. (2019). Preparation and properties of phenolic foam reinforced with graphene oxide modified with silane coupling agent. *Journal of Cellular Plastics*, 55(1), 67-82.
- [84] Ebeling, N., Li, L., & Sain, M. (2017). Natural fibers for phenolic foam applications: A review. *Polymer Composites*, 38(6), 1204-1217.
- [85] Hao, L., Zhang, Y., Cao, X., & Ren, J. (2020). Improving the flame retardancy of phenolic foam by incorporation of metal-organic framework derived nitrogen-rich carbon nanofiber aerogel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(5), 3541-3550.
- [86] Lv, Y., Jia, P., Tian, L., & Lu, C. (2020). Characterization and properties of phenolic foam reinforced with surface modified basalt fibers. *Polymers*, 12(9), 1923.
- [87] Xu, J., Zhang, D., Li, J., & Sun, X. (2017). Thermal and mechanical properties of phenolic foam reinforced with recycled glass fiber mat. *Journal of Cellular Plastics*, 53(6), 537-552.
- Ibhaddon, A. O., & Fitzpatrick, P. (2013). Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications. *Catalysts*, 3(1), 189-218
 - Collect Tara (2021). La rizosfera está densamente poblada por una variedad de microorganismos. Recuperado de: <https://www.facebook.com/CollectTara/photos/a.2029157210555183/2247936728677229/?type=3>
 - González Arazo J. (2021). Tipos de suelos: ¿cómo saber cuál es el de mi jardín?. Crehana. Recuperado de: <https://www.crehana.com/blog/estilo-vida/tipos-de-suelos/>

Abreviaturas

NP	Nanopartículas
TiO₂	Dióxido de titanio
TNT	Titanatos de hidrógeno
N	Símbolo químico del Nitrógeno
P	Símbolo químico del Fósforo
K	Símbolo químico del Potasio
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
K⁺	Ión potasio
NO₃⁻	Nitrato
PO₄³⁻	Fosfato
NaOH	Hidróxido de sodio
HCl	Ácido clorhídrico
TNT 2%N / TNT 2N	Titanatos de hidrógeno dopados al 2% con Nitrógeno
TNT 5%N / TNT 5N	Titanatos de hidrógeno dopados al 5% con Nitrógeno
TNT 2%P / TNT 2P	Titanatos de hidrógeno dopados al 2% con Fósforo
TNT 5%P / TNT 5P	Titanatos de hidrógeno dopados al 5% con Fósforo
TNT 2%K / TNT 2K	Titanatos de hidrógeno dopados al 2% con Potasio
TNT 5%K / TNT 5K	Titanatos de hidrógeno dopados al 5% con Potasio
TNT %X	Titanatos de hidrógeno dopados
UV-Vis	Espectroscopia Ultra Violeta – Visible
FTIR	Espectroscopía Infrarrojo por transformada de Fourier
BET	Fisisorción de Nitrógeno
SiO₂	Dióxido de silicio
Al₂O₃	Trióxido de aluminio
K₂O	Óxido de potasio
Na₂O	óxido de sodio
Fe₂O₃	óxido de hierro
CaO	óxido de calcio
MgO	óxido de magnesio