



## **Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso.**

**Producto 9: Documento de investigación que valide el efecto de los nanofertilizantes en la respuesta espectral de los cultivos.**

**[Henry Antonio Pacheco Gil, Ezequiel Zamora Ledezma, Roger Adrián Delgado Alcívar]**

**2025**



Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus directorios ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Henry Antonio Pacheco Gil y Ezequiel Zamora Ledezma, tomando como base la tesis de grado realizada por el estudiante Roger Adrián Delgado Alcívar de la Maestría en Agroecología y Cambio Climático de la de la Universidad Técnica de Manabí, proyecto titulado “Respuesta espectral del cultivo de maíz, bajo diferentes condiciones de fertilización”.

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

**FONTAGRO**

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)

[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)



# Tabla de Contenidos

<b>RESUMEN</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>9</b>
General	9
Específicos	9
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>10</b>
Medición de Variables Morfológicas	11
<b>RESULTADOS</b>	<b>13</b>
<b>DISCUSIÓN</b>	<b>16</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>17</b>
Conclusiones	17
Recomendaciones	18
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>19</b>
<b>INSTITUCIONES PARTICIPANTES</b>	<b>20</b>



## INDICE CUADROS

Cuadro 1. Índices espectrales y variables morfológicas.	11
Cuadro 2. Estadísticas de los valores de NDVI, según tipo de fertilización	14
Cuadro 3. Estadísticas de los valores de NDVI, según tipo de fertilización	15

## INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Ubicación zona de estudio	10
Gráfico 2. Ortotofoto	13

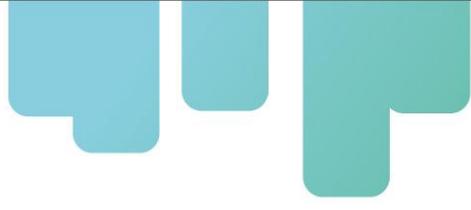


## RESUMEN

Este documento presenta el efecto de los nanofertilizantes en la respuesta espectral de los cultivos de maíz realizado en el marco del proyecto Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso, financiado por FONTAGRO y ejecutado por la Universidad Industrial de Santander (Colombia) y la Universidad Técnica de Manabí (Ecuador). Esta nota técnica corresponde al producto 9, relacionado con la validación del efecto de los nanofertilizantes en la respuesta espectral de los cultivos. Se llevó a cabo un experimento en bloques completamente al azar con diferentes tratamientos de fertilización utilizando dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) y zeolita. Se capturaron imágenes multispectrales con drones para calcular índices espectrales, como NDVI y GCI, y evaluar la respuesta de los cultivos de maíz. Los resultados del estudio indican que el uso de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) como nanofertilizante en el cultivo de maíz mejora significativamente los índices espectrales, alcanzando un promedio de NDVI de 0.908, lo que refleja un mayor vigor y salud de las plantas. Los cultivos tratados con óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) también mostraron beneficios, con un NDVI promedio de 0.904. En contraste, la zeolita no presentó efectos significativos. La teledetección mediante drones facilitó el monitoreo preciso de los cultivos, destacando el potencial de los nanofertilizantes para optimizar la producción en condiciones adversas en Manabí. Estos hallazgos subrayan la importancia de adoptar tecnologías innovadoras en la agricultura para mejorar la sostenibilidad y productividad en la región.

## ABSTRACT

This paper presents the effect of nanofertilizers on the spectral response of corn crops, conducted in the framework of the project Nanofertilisers in soil and Nitrous Oxide Emissions, funded by FONTAGRO and executed by the Universidad Industrial de Santander (Colombia) and the Universidad Técnica de Manabí (Ecuador). This technical note corresponds to product 9, related to the validation of the effect of nanofertilizers on the spectral response of crops. A completely randomized block experiment was conducted with different fertilization treatments using titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ), zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) and zeolite. Multispectral images were captured with drones to calculate spectral indices, such as NDVI and GCI, and to assess the response of corn crops. The study results indicate that the use of titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) as a nanofertilizer in corn crops significantly improves spectral indices, achieving an average NDVI of 0.908, reflecting greater plant vigor and health. Crops treated with zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) also showed benefits, with an average NDVI of 0.904. In contrast, zeolite did not present significant effects. Remote sensing using drones facilitated precise monitoring of crops, highlighting the potential of nanofertilizers to optimize production under adverse conditions in Manabí. These findings underscore the importance of adopting innovative technologies in agriculture to enhance sustainability and productivity in the region.



## RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto se diseñó con el objetivo de evaluar los efectos de distintos nanofertilizantes sobre la respuesta espectral del cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas de la provincia de Manabí, Ecuador. Esta región enfrenta desafíos climáticos significativos, como el clima tropical seco y suelos de baja fertilidad, lo que dificulta la agricultura tradicional. Además de estas condiciones adversas, los pequeños productores de la zona, que constituyen la mayor parte de los agricultores, suelen enfrentar limitaciones económicas que restringen su acceso a insumos agrícolas convencionales y tecnologías avanzadas. Por tanto, es fundamental desarrollar estrategias que permitan una gestión más eficiente de los recursos, como los nanofertilizantes, para aumentar la productividad sin incrementar los costos significativamente.

El estudio se realizó mediante un diseño de bloques completamente al azar, donde se aplicaron tres tipos de nanofertilizantes: Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ), Óxido de Zinc ( $\text{ZnO}$ ) y Zeolita. Para evaluar los efectos de estos tratamientos en las parcelas experimentales, se utilizaron drones para capturar imágenes multiespectrales. Los índices espectrales derivados de estas imágenes sirvieron como indicadores del vigor y la salud de las plantas de maíz en cada uno de los tratamientos aplicados. Los resultados demostraron que las parcelas tratadas con  $\text{TiO}_2$  presentaron los mayores niveles de vigor, reflejados en los índices espectrales, lo que sugiere que este nanofertilizante ofrece el mayor beneficio para el cultivo de maíz en las condiciones locales de Manabí. Le siguieron en rendimiento las parcelas tratadas con Óxido de Zinc, mientras que las parcelas tratadas con Zeolita mostraron el menor vigor. Estos hallazgos son especialmente relevantes para los pequeños agricultores, ya que los nanofertilizantes, al mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes, podrían reducir la necesidad de insumos convencionales costosos, ofreciendo una alternativa más viable para aumentar los rendimientos agrícolas en regiones económicamente vulnerables. En conclusión, los nanofertilizantes, particularmente el  $\text{TiO}_2$ , presentan un gran potencial para mejorar la productividad del maíz en las condiciones desafiantes de Manabí. Este tipo de proyectos son esenciales en áreas donde los recursos económicos y naturales son limitados, ya que pueden contribuir a una agricultura más sostenible y eficiente. Se recomienda seguir investigando el uso de estas tecnologías en diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, así como promover su difusión entre los pequeños agricultores para mejorar su acceso a tecnologías innovadoras que puedan transformar su producción.

**PALABRAS CLAVE:** Nanofertilizantes, Maíz, Imágenes Multiespectrales, Agricultura de Precisión, Manabí.



## INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes en la provincia de Manabí, Ecuador, tanto para el consumo local como para el mercado nacional. Sin embargo, su productividad enfrenta varios desafíos debido a las condiciones agroecológicas desfavorables, que incluyen un clima tropical seco y suelos de baja fertilidad. Estas condiciones dificultan el rendimiento de los cultivos y afectan la seguridad alimentaria de la región. Aunado a esto, la mayoría de los pequeños productores en Manabí se ven limitados por recursos económicos insuficientes, lo que restringe su capacidad para acceder a insumos agrícolas convencionales o tecnologías más avanzadas que podrían mejorar su producción. Ante esta situación, surge la necesidad de identificar nuevas estrategias que optimicen la fertilización y mejoren la productividad del maíz sin incrementar significativamente los costos de producción.

En este contexto, los nanofertilizantes han emergido como una tecnología prometedora para mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Estos productos, al liberar nutrientes de manera controlada y más eficiente, podrían ofrecer una solución viable para pequeños productores que buscan maximizar el uso de recursos limitados y mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura. El principal problema que enfrenta la agricultura en Manabí es la baja eficiencia en el uso de fertilizantes tradicionales en condiciones adversas de clima y suelo, lo que genera bajos rendimientos y afecta negativamente la economía local. Según Rodríguez-Seijo et al. (2024), el uso de nanopartículas en fertilizantes puede incrementar la absorción de nutrientes por parte de las plantas, resultando en un crecimiento más vigoroso y una mayor resistencia a condiciones de estrés.

Con esta investigación se pretende dar luces a las siguientes interrogantes: ¿Qué efecto tienen los nanofertilizantes en los índices espectrales que reflejan el vigor y la salud del maíz? ¿Qué nanofertilizante muestra un mayor impacto en la mejora del crecimiento del maíz bajo las condiciones agroecológicas de Manabí? ¿Cómo puede el uso de nanofertilizantes contribuir a una mayor eficiencia en el uso de nutrientes en el maíz, reduciendo costos para los pequeños productores?

La hipótesis planteada sostiene que los nanofertilizantes mejorarán significativamente los índices espectrales asociados con el vigor y la salud del cultivo en comparación con fertilizantes convencionales, permitiendo una mejor absorción de nutrientes y resultando en mayores rendimientos sin incrementar considerablemente los costos de producción.

Investigaciones previas, como las de Thakur et al. (2024), indican que los nanofertilizantes pueden proporcionar una liberación controlada de nutrientes, lo que reduce la necesidad de aplicaciones frecuentes y disminuye la lixiviación en suelos pobres. En el contexto específico del maíz, Shah et al. (2021) y Mehmood et al. (2023) encontraron que el uso de nanopartículas promovió un incremento significativo en la biomasa y el rendimiento del cultivo en condiciones adversas. En



este sentido, la implementación de nanofertilizantes en Manabí representa una oportunidad para mejorar la productividad agrícola de manera sostenible, ofreciendo una solución viable para los pequeños productores que buscan optimizar el uso de insumos agrícolas.



## OBJETIVOS

### General

Evaluar los efectos de los nanofertilizantes sobre la respuesta espectral del cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas de Manabí, utilizando imágenes multispectrales capturadas con drones para calcular índices de vigor y salud del cultivo.

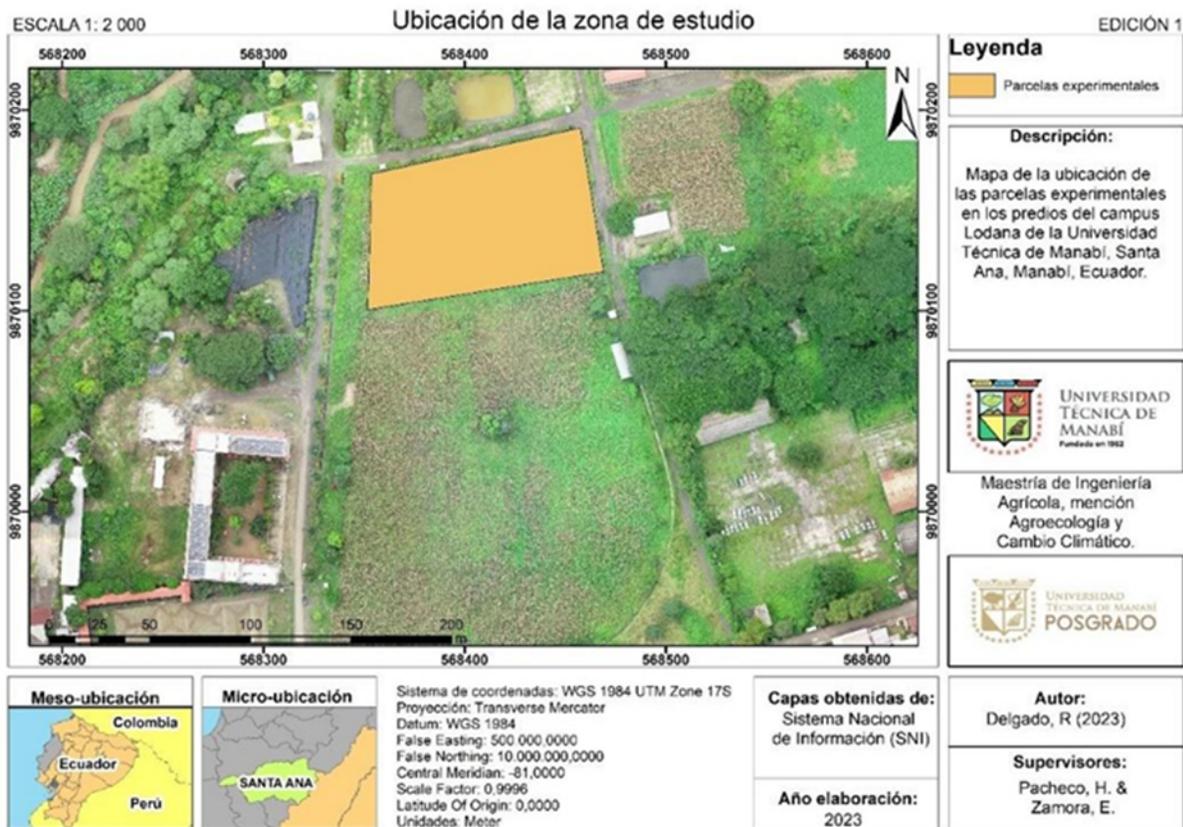
### Específicos

- Analizar el impacto de tres tipos de nanofertilizantes —Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ), Óxido de Zinc ( $\text{ZnO}$ ) y Zeolita— sobre los índices espectrales del maíz.
- Comparar la eficiencia de cada uno de ellos en términos de mejora del crecimiento del cultivo en suelos pobres y clima seco.
- Proporcionar recomendaciones sobre el uso de nanofertilizantes en cultivos de maíz, considerando la relación costo-beneficio para los pequeños agricultores de la región.

## METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en el cantón Santa Ana (parroquia Lodana), en la provincia de Manabí, específicamente en el campus Lodana donde se encuentra la Facultad de Ingeniería Agrícola (FIA) de la Universidad Técnica de Manabí (UTM) (ver Gráfico 1), entre las coordenadas proyectadas UTM, zona 17 sur, X:568414 Y: 9870120, Datum WGS 198.

**Gráfico 1. Ubicación zona de estudio.**



El cultivo fue de maíz (*Zea mays*), con diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada en 4 bloques completos al azar (BCA), cada uno con 8 unidades experimentales con un total de 32 parcelas. El diseño factorial fue de  $4 \times 4 \times 2$ , es decir, cuatro tratamientos con igual número de repeticiones y dos variedades de siembra. Las dimensiones de cada parcela fue de 8 x 12 m, teniendo como superficie 96 m<sup>2</sup>, posterior al mecanizado del suelo fueron sembradas con aproximadamente 900 plantas cada una.

Los tratamientos se observan en el Cuadro 1 y se aplicaron en dos momentos diferentes del desarrollo del cultivo, a los 10 y 28 días después de la siembra.

Ocho días después de cada tratamiento se realizaron vuelos fotogramétricos, sobre el diseño

experimental, para la captura de imágenes RGB y multiespectrales que permitieron, posteriormente calcular los índices espectrales. Para ello, se utilizó el dron eBee SQ (ver Gráfico 2), que es una avanzada herramienta tecnológica diseñada para aplicaciones en agricultura de precisión. Con un peso ligero (0,7 kg) y una estructura compacta, ofrece una gran versatilidad y facilidad de uso. Los datos recolectados por el dron fueron procesados y analizados, con el software PIX4D para obtener productos fotogramétricos como bandas espectrales, MDS y nube de puntos pueden ser utilizados en la toma de decisiones informadas sobre la gestión del cultivo, optimizando el uso de recursos y mejorando la productividad agrícola.

**Cuadro 1. Índices espectrales y variables morfológicas.**

Índice/Variable	Fórmula	Descripción
NDVI (Índice de Vegetación)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	Mide la salud de la vegetación. NIR: reflejo en infrarrojo cercano, R: reflejo en rojo.
GCI (Índice de Clorofila Verde)	$GCI = (NIR / G) - 1$	Estima el contenido de clorofila. NIR: reflejo en infrarrojo cercano, G: reflejo en verde.
IAF (Índice de Área Foliar)	$IAF = (\text{Área foliar total} / \text{Área del suelo}) \times 100$	Proporción de área foliar en relación al área del suelo.
Altura de planta (cm)	Medición directa con cinta métrica	Altura de la planta desde la base hasta la parte superior.
Diámetro de tallo (cm)	Medición directa con calibrador	Diámetro del tallo a una altura específica del suelo.

El estudio se llevó a cabo en un campo de maíz donde se aplicaron los tratamientos con los nanofertilizantes seleccionados, además de un grupo de control con prácticas agrícolas convencionales. Se utilizó un dron DJI Phantom equipado con una cámara multiespectral para capturar imágenes en diferentes longitudes de onda, incluyendo el espectro visible y el infrarrojo cercano. La planificación del vuelo se realizó utilizando software especializado, asegurando una adecuada superposición de imágenes para el posterior análisis.

Durante el proceso de captura, se definieron rutas de vuelo a una altitud entre 60 y 120 metros, lo que garantizó la obtención de imágenes de alta resolución. Tras la captura, las imágenes fueron procesadas para calcular índices espectrales de clorofila y variables morfológicas como la altura de planta, el diámetro de tallo y el índice de área foliar (IAF).

### Medición de Variables Morfológicas

Simultáneamente a los vuelos fotogramétricos (8 y 28 días después de la siembra) se seleccionaron al azar cinco plantas por parcela para la medición de las siguientes variables morfológicas: Altura de planta, diámetro de tallo e índice área foliar.



La altura de la planta se midió desde la base del tallo (nivel del suelo) hasta la punta de la hoja más alta completamente extendida. Se utilizó una cinta métrica flexible o una regla graduada en centímetros.

El diámetro del tallo se midió en la parte media del entrenudo basal utilizando un calibrador Vernier.

El índice de área foliar se determinó mediante un método no destructivo basado en la medición del largo y ancho de las hojas. Para cada hoja completamente expandida, se midió la longitud y el ancho máximo con una regla graduada. Se utilizó la ecuación:

$$\text{Area Foliar} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times 0,75$$

Donde 0.75 fue un coeficiente de corrección específico para maíz.

El índice de área foliar se calculó como:

$$IAF = \frac{\text{Área foliar total por planta} \times \text{densidad de plantas}}{\text{Área de la parcela}}$$

Esta metodología permitió evaluar de manera precisa el efecto de los tratamientos en el crecimiento y desarrollo del maíz mediante mediciones directas en campo.

## RESULTADOS

La ortofoto muestra la respuesta espectral diferencial del cultivo, en tonalidades de verde, respecto a los diferentes tratamientos de fertilización (ver Gráfico 2).

**Gráfico 2. Ortofotofoto.**



Los análisis preliminares revelaron que los cultivos tratados con  $\text{TiO}_2$  presentaron el valor más alto de NDVI (promedio 0,908), lo que sugiere un mayor vigor y mejor absorción de nutrientes en comparación con los otros tratamientos. Los cultivos tratados con  $\text{ZnO}$  también mostraron mejoras notables, con un promedio de 0,904, indicando una respuesta positiva de los cultivos a este fertilizante. Por el contrario, los cultivos tratados con zeolita no presentaron diferencias significativas en comparación con el grupo de control, y un NDVI promedio de 0,893, ligeramente inferior a los de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$ , lo que indica un menor impacto en la respuesta espectral del cultivo, con una eficacia limitada en este contexto. Finalmente, el tratamiento Tradicional presenta el NDVI más bajo, con un promedio de 0,889, lo que sugiere que las técnicas convencionales de fertilización pueden no ser tan efectivas como los nanofertilizantes evaluados (ver Cuadros 2 y 3).

**Cuadro 2. Estadísticas de los valores de NDVI, según tipo de fertilización**

ID	N° Celdas	Área (m <sup>2</sup> )	NDVI					Fertilización
			Min	Max	Range	Mean	Std	
24	5173	36,076	0,855	0,928	0,073	0,903	0,012	TiO
22	5176	36,097	0,859	0,932	0,074	0,904	0,012	TiO
14	5173	36,076	0,863	0,933	0,069	0,907	0,01	TiO
28	5171	36,062	0,860	0,930	0,070	0,909	0,010	TiO
0	5174	36,083	0,736	0,931	0,195	0,909	0,015	TiO
21	5173	36,076	0,872	0,933	0,061	0,910	0,010	TiO
30	5173	36,076	0,871	0,933	0,062	0,910	0,009	TiO
23	5173	36,076	0,877	0,933	0,056	0,912	0,008	TiO
	5173	36,078	0,849	0,932	0,083	0,908	0,011	Promedio TiO
12	5174	36,083	0,757	0,913	0,156	0,872	0,020	Tradicional
4	5174	36,083	0,639	0,925	0,286	0,883	0,033	Tradicional
1	5176	36,097	0,743	0,924	0,182	0,886	0,022	Tradicional
2	5172	36,069	0,814	0,920	0,105	0,892	0,013	Tradicional
11	5172	36,069	0,846	0,922	0,076	0,894	0,013	Tradicional
3	5174	36,083	0,820	0,926	0,106	0,894	0,014	Tradicional
7	5174	36,083	0,780	0,929	0,149	0,896	0,015	Tradicional
31	5176	36,097	0,856	0,922	0,067	0,900	0,010	Tradicional
	5174	36,083	0,782	0,923	0,141	0,889	0,018	Promedio Tradicional
20	5173	36,076	0,726	0,918	0,193	0,876	0,022	Ze
8	5174	36,083	0,787	0,919	0,131	0,883	0,018	Ze
9	5174	36,083	0,813	0,927	0,113	0,894	0,016	Ze
5	5173	36,076	0,828	0,931	0,103	0,895	0,015	Ze
19	5174	36,083	0,847	0,924	0,077	0,897	0,013	Ze
26	5175	36,090	0,860	0,922	0,063	0,898	0,011	Ze
15	5174	36,083	0,803	0,929	0,126	0,899	0,019	Ze
6	5173	36,076	0,782	0,933	0,151	0,899	0,018	Ze
	5174	36,081	0,806	0,925	0,120	0,893	0,016	Promedio Ze
13	5176	36,097	0,861	0,925	0,065	0,901	0,011	ZnO
10	5177	36,104	0,856	0,926	0,069	0,901	0,011	ZnO
17	5175	36,090	0,835	0,932	0,098	0,903	0,013	ZnO
27	5172	36,069	0,854	0,928	0,074	0,903	0,010	ZnO
18	5173	36,076	0,826	0,931	0,105	0,904	0,014	ZnO
25	5173	36,076	0,850	0,929	0,079	0,905	0,013	ZnO
29	5175	36,090	0,867	0,932	0,064	0,906	0,010	ZnO
16	51736	36,076	0,851	0,936	0,085	0,908	0,014	ZnO
	5174	36,084	0,850	0,930	0,080	0,904	0,012	Promedio ZnO



La desviación estándar varió entre 0,008 y 0,033 entre los tratamientos, con valores más bajos en  $\text{TiO}_2$  y ZnO, lo que sugiere una mayor estabilidad en la respuesta del cultivo. La mayor variabilidad se observó en el tratamiento Tradicional (0,033 de desviación estándar en una de las parcelas), lo que sugiere una respuesta menos homogénea del cultivo a este tipo de fertilización.

En el Cuadro 3 se observa que el índice de clorofila verde (GCI) fue más alto en el tratamiento con  $\text{TiO}_2$  (2,5), seguido de ZnO (2,1) y Tradicional (1,9), presentando el valor más bajo el tratamiento con Zeolita (1,8). Esto indica que los tratamientos con  $\text{TiO}_2$  y ZnO tiene una mayor eficiencia en la actividad fotosintética, lo que está alineado con los valores de NDVI observados en este mismo Cuadro.

**Cuadro 3. Estadísticas de los valores de NDVI, según tipo de fertilización**

Nanofertilizante	Índice NDVI Promedio	Índice GCI Promedio	Altura de Planta (cm)	Diámetro de Tallo (cm)	IAF (%)
Dióxido de Titanio	0.908	2.5	180	3.5	45
Dióxido de Zinc	0.904	2.1	165	3.2	40
Zeolita	0.893	1.8	150	2.8	35
Tradicional	0.889	1.9	155	3.0	38

Respecto a la altura de las plantas,  $\text{TiO}_2$  mostró el mayor crecimiento con un promedio de 180 cm, seguido de ZnO (165 cm), Tradicional (155 cm) y Zeolita (150 cm), lo que sugiere que la aplicación de  $\text{TiO}_2$  y ZnO favoreció un mejor desarrollo estructural del cultivo. Además, el diámetro del tallo también fue mayor en el tratamiento con  $\text{TiO}_2$  (3.5 cm) indicando mayor robustez de las plantas, mientras que ZnO (3.2 cm), Tradicional (3.0 cm) y Zeolita (2.8 cm) presentaron valores menores. Finalmente, el índice de área foliar (IAF) más alto se presentó en  $\text{TiO}_2$  (45%), indicando una mayor cobertura de hojas y una mejor capacidad de captura de luz.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que el uso de  $\text{TiO}_2$  como nanofertilizante es especialmente efectivo en el cultivo de maíz, reflejando una mejora notable en los índices espectrales de clorofila. Esta superioridad puede atribuirse a varias características únicas del  $\text{TiO}_2$ . En primer lugar, este compuesto es conocido por su capacidad para actuar como fotocatalizador, lo que significa que puede aumentar la actividad fotosintética de las plantas al mejorar la absorción de luz y la eficiencia en la conversión de energía (Moshirian Farahi et al., 2023). Esto se traduce en un crecimiento más vigoroso y una mayor producción de biomasa.

Además, el  $\text{TiO}_2$  puede influir en la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Al interactuar con otros nutrientes y mejorar su absorción, el  $\text{TiO}_2$  puede optimizar el crecimiento de las plantas y su capacidad para realizar la fotosíntesis (Vaishali et al., 2024). En contraste, el  $\text{ZnO}$ , aunque también beneficioso, parece tener un impacto más limitado en la mejora de los índices espectrales en comparación con el  $\text{TiO}_2$  (Özgören Can et al., 2024).

La falta de efecto de la zeolita puede explicarse por su naturaleza y modo de acción. La zeolita es conocida por sus propiedades de retención de agua y nutrientes, pero su capacidad para mejorar el rendimiento espectral puede ser inferior a la del  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  en condiciones de cultivo específicas (Jithendar et al., 2024). Esto sugiere que, si bien la zeolita puede ser útil en otros contextos, no es tan efectiva para el maíz en términos de respuesta espectral y morfológica.

Aunque las diferencias de los índices espectrales entre tratamientos, mostrados en el cuadro, sean pequeñas pueden tener implicaciones agronómicas significativas, ya que reflejan diferencias en el desarrollo vegetativo, el estado nutricional y el potencial de rendimiento de las plantas. Estudios recientes han demostrado que el NDVI tiene una correlación positiva con variables agronómicas clave en el maíz. Por ejemplo, Marin et al. (2021) mostraron una buena correlación con el rendimiento de mazorca y el rendimiento de forraje verde, especialmente en el estado fenológico V13 del maíz, con coeficientes de correlación superiores a 0.60 y coeficientes de determinación superiores a 0.36, indicando que incluso pequeñas diferencias en los valores de NDVI entre parcelas pueden señalar variaciones en la biomasa y el rendimiento potencial.

Es importante tener en cuenta que el NDVI puede verse influenciado por diversos factores, como la densidad de siembra, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones ambientales. Por lo tanto, al interpretar pequeñas diferencias en los valores de NDVI entre parcelas, es crucial considerar el contexto agronómico específico y complementar el análisis con otras herramientas de monitoreo para tomar decisiones de manejo informadas.

El monitoreo continuo con índices espectrales permite a los agricultores identificar áreas que requieren atención específica, optimizar la aplicación de insumos y mejorar la eficiencia en la gestión del cultivo.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Los resultados del estudio evidencian la posible eficacia del dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) como nanofertilizante en el cultivo de maíz, reflejando un índice NDVI promedio de 0.908. Este valor sugiere un incremento en el vigor y la salud de las plantas, lo que sugiere el potencial del  $\text{TiO}_2$  para optimizar la producción agrícola en condiciones agroecológicas adversas, como las que se presentan en Manabí. La capacidad del  $\text{TiO}_2$  para actuar como fotocatalizador también puede contribuir a mejorar la actividad fotosintética, facilitando así una mayor absorción de luz y eficiencia en la conversión de energía, lo que se traduce en un crecimiento más robusto y en una producción de biomasa superior.

Por otro lado, los cultivos tratados con óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) también mostraron mejoras en los índices espectrales, alcanzando un índice NDVI promedio de 0.904. Sin embargo, su impacto fue inferior al del  $\text{TiO}_2$ , lo que sugiere que, aunque el  $\text{ZnO}$  es beneficioso, su efecto en el crecimiento del maíz es más limitado. Estos hallazgos subrayan la importancia de evaluar cuidadosamente el tipo de nanofertilizante a utilizar para maximizar los beneficios en el cultivo.

Un hallazgo crucial del estudio fue la falta de efecto significativo de la zeolita, que presentó un índice NDVI promedio de 0.893 y no mostró diferencias relevantes en comparación con el grupo de control. Esto indica que, aunque la zeolita es conocida por sus propiedades de retención de agua y nutrientes, su efectividad como nanofertilizante en el contexto del cultivo de maíz es limitada. Este resultado sugiere que la zeolita puede no ser la opción más adecuada para mejorar la respuesta espectral y morfológica del maíz en estas condiciones específicas.

Además, los análisis morfológicos complementarios revelaron que los cultivos tratados con  $\text{TiO}_2$  no solo exhibieron índices espectrales superiores, sino que también alcanzaron una mayor altura (180 cm), diámetro de tallo (3.5 cm) e índice de área foliar (IAF del 45%). Esto resalta la importancia de utilizar nanofertilizantes que no solo impacten positivamente en los índices espectrales, sino que también contribuyan al desarrollo físico del cultivo, permitiendo así una mejor adaptación a las condiciones adversas del entorno.

Finalmente, la integración de teledetección mediante drones fue fundamental en este estudio, permitiendo la obtención de imágenes multiespectrales precisas y la evaluación de los índices espectrales con gran detalle. Esta tecnología ofrece una herramienta poderosa para monitorear el crecimiento y la salud de los cultivos en tiempo real, proporcionando datos valiosos que pueden informar decisiones agronómicas. Los resultados destacan la necesidad de seleccionar adecuadamente los nanofertilizantes en función de sus características específicas y el contexto agroecológico, reforzando la idea de que la elección del tipo de nanofertilizante puede influir considerablemente en el rendimiento del cultivo y, por ende, en la sostenibilidad de la producción agrícola en Manabí.



## Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda continuar con estudios más detallados en la región de Manabí que adopten el uso de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y otros nanofertilizante en el cultivo de maíz.

Además, es fundamental proporcionar capacitación a los productores sobre su correcta aplicación y manejo, con el fin de maximizar los beneficios que los nanofertilizante pueden ofrecer.

Es igualmente importante realizar evaluaciones continuas sobre la efectividad de otros nanofertilizantes, como el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) y la zeolita, en combinación con el  $\text{TiO}_2$ . Esta investigación permitirá a los productores adoptar un enfoque más integral en la fertilización, considerando las condiciones específicas del suelo y del clima en la región.

Finalmente, se sugiere que los agricultores y organismos de investigación inviertan en tecnologías de teledetección, como el uso de drones, para monitorear de manera efectiva la salud de los cultivos. La implementación de estas tecnologías facilitará una gestión más precisa de la fertilización y ayudará a identificar rápidamente las áreas que requieren atención, optimizando así los recursos y mejorando la producción agrícola en Manabí.

Al adoptar estas recomendaciones, se busca no solo incrementar la productividad, sino también contribuir a la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas en una región con condiciones climáticas y económicas desafiantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jithendar, B., Kumar, R., & Rana, N. (2024). Revolutionizing Crop Nutrition: Exploring Nano Fertilizers in Agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(6), 327–339. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i64635>
- Marín, C. A., Ramírez, J. F., & López, H. (2021). Correlación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) con variables agronómicas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). 1Library. Recuperado de <https://1library.co/article/correlaci%C3%B3n-%C3%ADndice-vegetaci%C3%B3n-diferencia-normalizada-ndvi.y6eo2w4z>
- Mehmood, S., Ou, W., Ahmed, W., Bundschuh, J., Rizwan, M., Mahmood, M., Sultan, H., Alatalo, J. M., Elnahal, A. S. M., Liu, W., & Li, W. (2023). ZnO nanoparticles mediated by *Azadirachta indica* as nano fertilizer: Improvement in physiological and biochemical indices of *Zea mays* grown in Cr-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 339, 122755. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122755>
- Moshirian Farahi, S. M., Taghavizadeh Yazdi, M. E., Einafshar, E., Akhondi, M., Ebadi, M., Azimipour, S., Mahmoodzadeh, H., & Iranbakhsh, A. (2023). The effects of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles on physiological, biochemical, and antioxidant properties of *Vitex agnus - Castus* L. *Heliyon*, 9(11), e22144. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22144>
- Özgören Can, T., Aydin, Y., Utkan, G., & Altinkut Uncuoğlu, A. (2024). Green synthesis and characterization of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO and TiO<sub>2</sub> nanoparticles and searching for their potential use as biofertilizer on sunflower. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 30(9), 1429–1447. <https://doi.org/10.1007/s12298-024-01508-8>
- Rodríguez-Seijo, A., Santas-Miguel, V., Arenas-Lago, D., Arias-Estévez, M., & Pérez-Rodríguez, P. (2024). Use of nanotechnology for safety agriculture and food production: challenges and limitations. *Pedosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.09.005>
- Shah, T., Latif, S., Saeed, F., Ali, I., Ullah, S., Abdullah Alsahli, A., Jan, S., & Ahmad, P. (2021). Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Journal of King Saud University - Science*, 33(1), 101207. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.10.004>
- Thakur, N., Thakur, N., Kumar, A., Thakur, V. K., Kalia, S., Arya, V., Kumar, A., Kumar, S., & Kyzas, G. Z. (2024). A critical review on the recent trends of photocatalytic, antibacterial, antioxidant and nanohybrid applications of anatase and rutile TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Science of The Total Environment*, 914, 169815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169815>
- Vaishali, K., Nirmala, M., Pavithra, N., & Balakrishnan, K. (2024). Sol gel synthesis of undoped and Nitrogen doped Titanium Dioxide nanoparticles as nano fertilizer for plant growth. *International Journal of Nano Dimension*, 15(4).

# INSTITUCIONES PARTICIPANTES



UNIVERSIDAD  
TÉCNICA DE  
MANABÍ  
Fundada en 1952

Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)