

**Viabilidad en la aplicación de nanopartículas de Sílice para el mejoramiento ⁱ
de la calidad del suelo del cultivo de caña de azúcar en el municipio de
Piedecuesta en Santander**

Arley Alfonso Rueda Roa

000221931

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2021

**Viabilidad en la aplicación de nanopartículas de sílice para el mejoramiento ⁱⁱ
de la calidad del suelo del cultivo de caña de azúcar en el municipio de
Piedecuesta en Santander**

Arley Alfonso Rueda Roa

000221931

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Directora del proyecto:

Dra. Sandra Natalia Correa Torres

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2021

A mi abuelo que en paz descansa que siempre me apoyo y no pudo lograr terminar de ver el profesional en el que me convertí, a mi abuela por su dedicación y paciencia, a mis padres por su guía y amor y finalmente a mi tía una segunda madre que nunca me dejo perder el rumbo del proceso, a ustedes les debo todo lo que soy y por los cuales estoy hoy aquí.

AGRADECIMIENTOS

iv

A mis padres, Martha Roa y Wilson Rueda por darme la vida y educarme en un hogar honrado y trabajador, en especial mi madre por forjar mi carácter con su ejemplo de tesón y sus deseos de superación.

A mi tía, Luz Stella Mutis por ser mi pilar educativo, mi concejera y amiga y un ejemplo de bondad y convicción.

A mis abuelos, Flor Mutis y José Rueda por ayudarme a crecer rodeado de amor y apoyo incondicional.

A cada uno de los docentes de la Universidad Pontificia Bolivariana, en especial los de la facultad de ingeniería ambiental por ser parte integral en mi preparación profesional.

Al señor Álvaro Aceros y su esposa Ofelia, por abrirme las puertas de su hogar desinteresadamente y ayudarme con la investigación en su finca.

Finalmente, la Doctora Sandra Natalia Correa Torres por ser la gestora y asesora de este proyecto y compartir su conocimiento conmigo a lo largo no solo del proyecto si no de la carrera, con paciencia y dedicación.

A todos ustedes, desde el fondo de mi corazón muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDOS

v

INTRODUCCIÓN	3
1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	4
2. ALCANCE.....	5
3. JUSTIFICACIÓN	6
4. OBJETIVOS	7
4.1. Objetivo General.....	7
4.2. Objetivos Específicos.....	7
5. MARCO TEÓRICO.....	8
5.1. Cultivo de caña de azúcar	8
5.1.1. <i>Generalidades del cultivo de caña de azúcar</i>	8
5.1.1.1. Origen del cultivo.	8
5.1.1.2. Distribución geográfica del cultivo.....	9
5.1.1.3. Taxonomía del cultivo de caña de azúcar.	10
5.1.1.4. Morfología del cultivo de caña de azúcar.	11
5.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo.	14
5.2.1. <i>Clasificación de los principales nutrientes</i>	15
5.2.2. <i>Requerimientos del cultivo de caña</i>	16
5.3. Descripción de las nanopartículas.....	16
5.3.1. <i>Tipos de nanopartículas</i>	17
5.3.1.1. Orgánicas.	17
5.3.1.2. Inorgánicas.....	17

5.3.2.	<i>Nanopartículas de Sílice</i>	18vi
5.3.3.	<i>Síntesis de nanopartículas</i>	19
5.3.3.1.	Procesos top-down.....	19
5.3.3.2.	Procesos bottom-up.....	19
5.3.4.	<i>Síntesis verde de nanopartículas</i>	19
5.3.4.1.	Síntesis verde de nanopartículas de Sílice.	20
5.4.	Zona de muestreo.....	20
6.	METODOLOGÍA.....	22
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
7.1.	Identificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo.....	27
7.1.1.	<i>Análisis de suelo de la zona de interés en Piedecuesta.</i>	27
7.2.	Características de las nanopartículas.	29
7.2.1.	<i>Nanopartículas de Zinc</i>	29
7.2.2.	<i>Nanopartículas de Plata</i>	30
7.2.3.	<i>Nanopartículas de Oro</i>	31
7.2.4.	<i>Nanopartículas de Cobre</i>	33
7.2.5.	<i>Nanopartículas de Sílice</i>	34
7.2.6.	<i>Análisis de afinidad de las nanopartículas</i>	35
7.3.	Viabilidad de las nanopartículas de Sílice	36
7.3.1.	<i>Diseño Experimental para aplicar las nanopartículas de Sílice en el laboratorio.</i> ..	42
8.	CONCLUSIONES	45
9.	RECOMENDACIONES.....	47
10.	BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE TABLAS

vii

Tabla 1. <i>Distribución del cultivo y producción de panela.</i>	9
Tabla 2. <i>Clasificación taxonómica de la caña de azúcar.</i>	11
Tabla 3. <i>Principales nutrientes para las plantas.</i>	15
Tabla 4. <i>Rangos críticos de algunos fertilizantes en caña.</i>	16
Tabla 5. <i>Diseño metodológico.</i>	26
Tabla 6. <i>Análisis fisicoquímico del suelo de la finca “San Francisco”.</i>	27
Tabla 7. <i>Caracterización nanopartículas de Zinc.</i>	30
Tabla 8. <i>Caracterización nanopartículas de Plata.</i>	31
Tabla 9. <i>Caracterización nanopartículas de Oro.</i>	32
Tabla 10. <i>Caracterización nanopartículas de Cobre.</i>	33
Tabla 11. <i>Caracterización nanopartículas de Sílice.</i>	34
Tabla 12. <i>Análisis de la afinidad de las nanopartículas con el cultivo de caña.</i>	35
Tabla 13. <i>Viabilidades adicionales de las partículas de Sílice.</i>	41
Tabla 14. <i>Parámetros de los cuadrantes de suelo.</i>	42
Tabla 15. <i>Diseño experimental de los cuadrantes.</i>	43

LISTA DE FIGURAS

viii

Figura 1. <i>Cultivo de caña.</i>	11
Figura 2. <i>Sistema radical de la caña de azúcar.</i>	12
Figura 3. <i>Tallo de la caña de azúcar.</i>	13
Figura 4. <i>Hoja de la caña de azúcar.</i>	13
Figura 5. <i>Flor de la caña de azúcar.</i>	14
Figura 6. <i>Diferentes tipos de nanopartículas.</i>	18
Figura 7. <i>Nanopartículas de Zinc.</i>	30
Figura 8. <i>Nanopartículas de Plata.</i>	31
Figura 9. <i>Nanopartículas de Oro.</i>	32
Figura 10. <i>Nanopartículas de Cobre.</i>	33
Figura 11. <i>Nanopartículas de Sílice.</i>	34
Figura 12. <i>Aplicaciones agrícolas de las nanopartículas de Sílice.</i>	38
Figura 13. <i>Representación gráfica de los cuadrantes.</i>	44

LISTA DE DIAGRAMAS

ix

Diagrama 1. <i>Fases del proyecto</i>	23
Diagrama 2. <i>Actividades primera fase</i>	23
Diagrama 3. <i>Actividades segunda fase</i>	24
Diagrama 4. <i>Actividades tercera fase</i>	25
Diagrama 5. <i>Factores de viabilidad de las nanopartículas de Sílice</i>	40

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: VIABILIDAD EN LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL SUELO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA EN SANTANDER.

AUTOR(ES): Arley Alfonso Rueda Roa

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Dra. Sandra Natalia Correa Torres

RESUMEN

El presente trabajo de grado presenta una revisión sobre el estado actual de las nanopartículas de sílice así como su viabilidad para la aplicación en el mejoramiento en la calidad del suelo del cultivo de caña, se realizó una extensa revisión bibliográfica para determinar las características por las que destacan las nanopartículas de sílice para el caso concreto de aplicación mediante una comparativa con otras nanopartículas, además se presenta una caracterización del suelo de la zona de estudio permitiendo relacionar las necesidades de la zona con los beneficios ofrecidos por las nanopartículas de sílice. También se plantean alternativas para la sintetización verde de las nanopartículas y se diseñó un posible método para evaluar el resultado de la aplicación a diferentes concentraciones.

PALABRAS CLAVE:

Caña de azúcar, Nanopartículas, Sílice, Mejoramiento, Viabilidad.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: VIABILITY IN THE APPLICATION OF SILICA NANOPARTICLES FOR IMPROVING THE QUALITY OF THE SOIL OF SUGARCANE CROPS IN THE MUNICIPALITY OF PIEDECUESTA IN SANTANDER.

AUTHOR(S): Arley Alfonso Rueda Roa

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Sandra Natalia Correa Torres, PhD.

ABSTRACT

The present work of degree presents a review on the current state of silica nanoparticles as well as their viability for the application in the improvement in the quality of the sugarcane crop soil, an extensive bibliographic review was carried out to determine the characteristics by which Silica nanoparticles stand out for the specific application case by means of a comparison with other nanoparticles, in addition a characterization of the soil of the study area is presented allowing to relate the needs of the area with the benefits offered by the silica nanoparticles. Alternatives for the green synthesis of nanoparticles are also proposed, and a possible method was designed to evaluate the result of the application at different concentrations.

KEYWORDS:

Sugarcane, Nanoparticles, Silica, Improvement, Viability.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de ampliar el conocimiento que se tiene respecto a las nanopartículas y sus inmensas aplicaciones nos encontramos ante investigaciones como esta, que permiten extrapolar estudios previos mediante una revisión bibliográfica en detalle a temas que competen el ámbito local, Santander es uno de los principales productores de panela en el país (Fedepanela, 2019) y por eso es importante explorar el impacto que tienen las nanopartículas en este importante sector económico regional.

El presente estudio se enfoca en la evaluación de la viabilidad de las nanopartículas de sílice, sus características y aplicaciones dirigidas al sector de la caña de azúcar en el municipio de Piedecuesta, esta caracterización y viabilidad se logra mediante comparativas con otros tipos de nanopartículas, permitiendo así identificar las propiedades particulares que las hacen tener afinidad con las características que presenta el suelo en cuestión.

Se evidencian los posibles beneficios que pueden ofrecer estas nanopartículas de sílice aplicadas al suelo y deja abierta la posibilidad de replicar los procesos en otras zonas cañeras en el país.

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia se cultivan cerca de 249.348 ha de caña de azúcar, siendo un cultivo significativo para el país, particularmente Santander con un área cultivada de 18.241 ha se ubica como uno de los principales productores de caña. Sin embargo, este cultivo no está exento de problemas tales como la sobre explotación del suelo debido al monocultivo causando una escasez de nutrientes y dejando expuesto el cultivo al ataque de microorganismos aunado a la contaminación ambiental afectando negativamente la productividad.

Teniendo en cuenta que la sílice es un componente importante dentro del suelo, la pregunta de investigación que surgió es: ¿Cuál es la viabilidad de la aplicación de nanopartículas de Sílice para el mejoramiento de la calidad del suelo del cultivo de caña en el municipio de Piedecuesta en Santander?

2. ALCANCE

Este proyecto está planteado para generar alternativas en el mejoramiento de la calidad del suelo en los cultivos de caña en el municipio de Piedecuesta en el departamento de Santander; a fin de brindar una base sólida, necesaria para una adecuada implementación de las mismas en el campo del agro departamental y nacional.

El proyecto permitirá definir la viabilidad en la aplicación de nanopartículas de Sílice para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo proveniente del cultivo de caña y así establecer alternativas al manejo tradicional de este cultivo.

3. JUSTIFICACIÓN

Las propiedades fisicoquímicas del suelo juegan un papel sumamente importante a la hora del desarrollo de los cultivos, tema que ha cobrado relevancia últimamente debido a una ineficiente gestión por parte de las autoridades competentes a la hora de la capacitación y tecnificación del agro.

Esto ha ocasionado un déficit en la calidad del suelo para el cultivo aunado al aumento de la población en los últimos años, se hace necesario una optimización de los cultivos partiendo de información reciente y actualizada en aras de lograr mitigar esta situación, por lo que es fundamental contar con las bases adecuadas como las generadas por este estudio para su mejoramiento y aplicación en planes que comprometen a estos factores.

4. OBJETIVOS

Para lograr el cumplimiento del proyecto titulado “Viabilidad en la aplicación de nanopartículas de sílice para el mejoramiento de la calidad del suelo del cultivo de caña en el municipio de Piedecuesta en Santander.” se presentan los siguientes objetivos:

4.1. Objetivo General

Estudiar la viabilidad al aplicar nanopartículas de Sílice para la capacidad de mejoramiento en la calidad del suelo en un cultivo de caña en el municipio de Piedecuesta en Santander.

4.2. Objetivos Específicos

- Identificar las propiedades fisicoquímicas en el suelo del cultivo de caña en el municipio de Piedecuesta en Santander.
- Establecer una comparativa entre las características de las nanopartículas de Sílice y algunas de las principales nanopartículas usadas en campo.
- Evaluar la viabilidad para la aplicación de nanopartículas de Sílice que mejoren las propiedades fisicoquímicas en el suelo del cultivo de caña.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Cultivo de caña de azúcar

El cultivo de interés en el que se desarrollara la investigación es el cultivo de caña de azúcar, dicho cultivo presenta una gran importancia dentro de los cultivos permanentes en Colombia con unas 249.348 Ha ubicándose en segundo lugar solo detrás del café (Espinal et al., 2004).

5.1.1. Generalidades del cultivo de caña de azúcar

Se presenta una descripción general del cultivo.

5.1.1.1. Origen del cultivo.

No se sabe a ciencia cierta el origen de este cultivo, para algunos autores su origen se localiza en el nordeste de la India, para otros sin embargo su origen es Nueva Guinea; extendiéndose luego a Borneo, Sumatra y la India, para posteriormente ser llevada por Alejandro Magno a Persia y de ahí a Oriente Medio, África y Europa.

La referencia escrita más antigua de la planta se encuentra en “El Código de Manú”, escrito por el primero de los Manú, un grupo de personajes heroicos hindús, más de mil años antes de la era cristiana (Corpoica, 1998).

Según Víctor Manuel Patiño, en su libro Esbozo histórico sobre la caña de azúcar: “La caña vino a Colombia en el año 1538 a través del puerto de Cartagena y dos años después en 1540 entró por Buenaventura al valle geográfico del río Cauca; en el Valle del Cauca, la caña de azúcar se puede observar desde épocas tan tempranas como el siglo XVI, cuando Sebastián de Belalcázar introdujo la gramínea desde Santo Domingo y la sembró en su estancia situada en cercanías a lo que hoy es Jamundí. La caña criolla que

trajeron los españoles a finales del período colonial, llegó de las Guayanas; la caña Tahití o Otahiti fue introducida al Valle entre 1802 y 1808. Entre 1930 y 1932 llegó la variedad POJ 2878, que hoy persiste en muchas zonas cañicultoras de Colombia, plantándose inicialmente en la margen izquierda del río Cauca, en Arroyohondo y Cañas Gordas, lugares muy cercanos a Cali, donde operan sendos trapiches paneleros”.

La proliferación del cultivo en el resto del país se dio a partir del Valle de Apulo, Rionegro y Guaduas en Cundinamarca, Valle de Tensa en Boyacá, Vélez en Santander y María la Baja en Bolívar (Manrique & Insuasty, 2000).

5.1.1.2. Distribución geográfica del cultivo.

La distribución geográfica de la caña de azúcar para la producción de panela se encuentra dispersa a lo largo del territorio, en la Tabla 1 se observa la participación preliminar de los diferentes departamentos en el cultivo:

Tabla 1.

Distribución del cultivo y producción de panela.

Departamento	Superficie ha	Producción Panela t	Rendimiento kg/ha
Antioquia	35.412	139.834	3.949
Arauca	360	907	2.519
Bolívar	1.058	6.510	6.153
Boyacá	20.991	285.048	13.580
Caldas	11.470	40.939	3.569
Caquetá	2.481	13.371	5.389
Cauca	11.386	49.896	4.382
Cesar	2.511	8.883	3.538

Chocó	1.856	2.515	1.355
Córdoba	7	28	4.000
Cundinamarca	45.529	181.423	3.985
Huila	8.468	79.795	9.423
Meta	1.433	1.803	1.258
Nariño	10.300	76.203	7.938
N. de Santander	13.622	52.262	3.837
Putumayo	408	1.328	3.034
Quindío	361	3.463	9.592
Risaralda	4.809	28.804	5.990
Santander	18.241	240.998	13.212
Sucre	177	750	4.249
Tolima	14.451	66.145	4.577
Valle	5.142	28.864	5.613
Total Nacional	210.858	1.309.679	6.211

Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

Particularmente en el departamento de Santander el cultivo de caña es uno de los principales hitos productivos, contando actualmente con 1.035 trapiches inscritos ante el Invima distribuidos en 35 municipios en 3 provincias con un total 8.500 fincas productoras. (Fedepanela, 2019) Los principales municipios productores se encuentran al sur del departamento dentro de las provincias Comunera, de Vélez y Guantánima, tales como Gambita, Confines, Socorro, San Gil y Mogotes, entre otros. Cerca de la capital del departamento el municipio de Piedecuesta aún mantiene remanentes de los cultivos de caña de antaño.

5.1.1.3. Taxonomía del cultivo de caña de azúcar.

La clasificación botánica de la caña de azúcar es presentada en la Tabla 2:

Tabla 2.

Clasificación taxonómica de la caña de azúcar.

Figura 1. Cultivo de caña.



Fuente: SIAP. (2012). Azúcar que endulza mi vida.

Reino:	Vegetal
Tipo:	Fanerógamas
Subtipo:	Angiospermas
Clase:	Monocotiledóneas
Orden:	Glumales
Familia:	Gramíneas
Tribu:	Andropogoneas
Género:	Saccharum
Especies:	Spontaneum y robustum (silvestres), edule, barberi, sinense y officinarum (domesticadas)

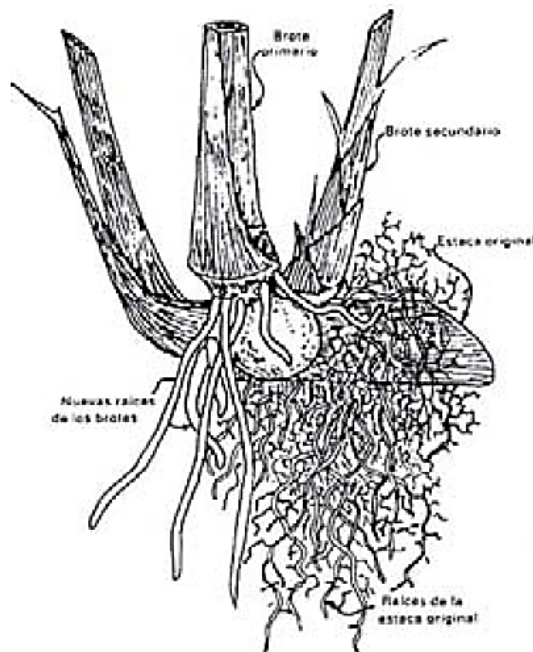
Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

5.1.1.4. Morfología del cultivo de caña de azúcar.

En la morfología del cultivo de caña de azúcar se encuentra el sistema radical, el tallo, la hoja y la flor (Osorio Cadavid, 2007).

- Las raíces: Constituyen el sostén subterráneo de la planta por donde se hace la absorción de agua y nutrientes, se distinguen dos tipos; las raíces primordiales y las raíces permanentes.

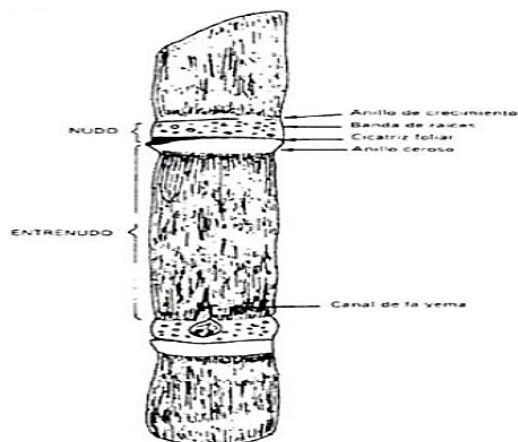
Figura 2. Sistema radical de la caña de azúcar.



Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

- El tallo: Es el órgano más importante dentro de la planta puesto que aquí se almacenan los azúcares, su longitud depende en gran medida del manejo que se le dé al cultivo, así como de las condiciones del medio; se identifican dos estructuras principales, el nudo y el entrenudo.

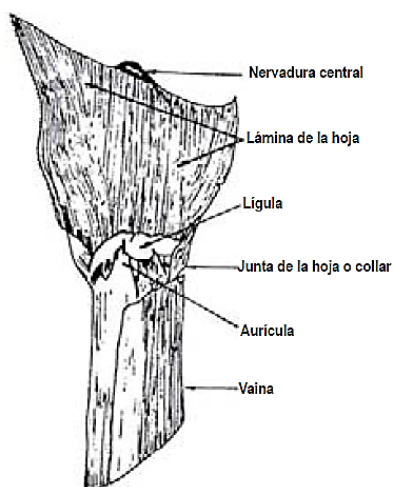
Figura 3. Tallo de la caña de azúcar.



Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

- La hoja: Se originan en los nudos y se van intercalando a lo largo del tallo, su color y forma dependen de la variedad de caña sembrada, puede o no tener presencia de pelos urticantes.

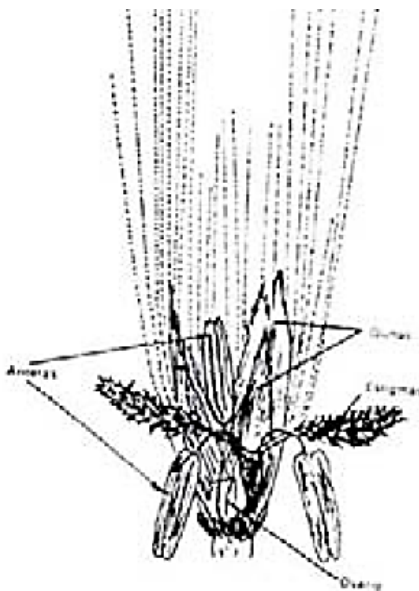
Figura 4. Hoja de la caña de azúcar.



Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

- La flor: Se presenta en forma de espiga con una panícula sedosa, con una configuración hermafrodita, solo se da bajo óptimas condiciones del cultivo.

Figura 5. Flor de la caña de azúcar.



Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

5.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo.

El análisis del suelo define, a través de un conjunto de determinaciones, la constitución y el contenido en elementos minerales que son rápidamente asimilables por las plantas. Por lo tanto, ofrecen al agricultor una mejor idea del suelo con el que cuenta y le brindan la posibilidad de aportar esta cantidad y calidad necesaria de macronutrientes y micronutrientes, ya sea con abonos minerales (medios químicos), o bien con estiércol o restos de cosechas (medios orgánicos). (Lopez & Miñano, 2008)

5.2.1. Clasificación de los principales nutrientes

Todos los elementos que participan en el proceso de la asimilación, y que forman los grupos vitales para la planta, representan la materia nutritiva vegetal indispensable.

Estos elementos básicos figuran en la Tabla 3:

Tabla 3.

Principales nutrientes para las plantas.

Tipo	Descripción	Elementos
Macroelementos primarios	En este grupo se encuentran los elementos que necesita la planta en cantidades significativas y cuyo contenido en el suelo generalmente no suele ser suficiente para cubrir sus necesidades.	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrógeno • Potasio • Fosforo
Macroelementos secundarios	En este grupo se ubican los elementos cuyas necesidades para la planta son igualmente elevadas pero su contenido en el suelo casi siempre es suficiente para cubrir las	<ul style="list-style-type: none"> • Calcio • Azufre • Magnesio
Microelementos	Este grupo está conformado por los elementos para los cuales la planta tiene necesidades mínimas y su disposición en el suelo es suficiente para cubrir las	<ul style="list-style-type: none"> • Hierro • Manganeso • Cobre • Zinc • Boro • Molibdeno • Cloro • Sílice

Fuente: Lopez, E., & Miñano, F. (2008). Métodos rápidos de análisis de suelos.

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.

5.2.2. *Requerimientos del cultivo de caña*

En la Tabla 4 se presentan algunos de los requerimientos específicos para el cultivo de caña, así como los niveles para dichos elementos.

Tabla 4.

Rangos críticos de algunos fertilizantes en caña.

Elemento	Bajo	Medio	Alto
Calcio	0-3 meq/100 g	3-6 meq/100 g	> 6 meq/100 g
Magnesio	0-1 meq /100 g	1-2 meq/100 g	> 2 meq/100 g
Azufre	0-6 ppm	6-12 ppm	> 12 ppm
Hierro	< 25 ppm	25 – 60 ppm	> 60 ppm
Materia orgánica	< 5%	5 – 10%	> 10%
Fósforo	< 10 ppm	10 – 20 ppm	> 20 ppm
Potasio	< 0.30 meq/100 g	0.60 meq/100 g	> 0.60 meq/100 g
Cobre	< 1 ppm	1 – 3 ppm	> 3 ppm
Boro	< 0.3 ppm	0.3 – 0.6 ppm	> 0.6 ppm
Manganeso	< 15 ppm	15 – 30 ppm	> 30 ppm
Zinc	< 1.5 ppm	1.5 – 3 ppm	> 3 ppm
Molibdeno	< 0.1 ppm	0.1 – 0.3 ppm	> 0.3 ppm

Fuente: Osorio, G. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela.

5.3. **Descripción de las nanopartículas**

Las nanopartículas están definidas como partículas que poseen las tres dimensiones menores que 100 nm (Vert et al., 2012) aunque esta definición también se incluye partículas que tienen al menos 2 de sus dimensiones por debajo de estos 100 nm. En la actualidad, la aplicación de nanopartículas se ha intensificado notablemente tanto

en el campo investigativo como en el industrial, debido a su enorme versatilidad para cumplir diferentes funciones que van desde la administración de fármacos (An et al., 2015), pasando por actores anti microbiológicos (Méndez-Vilas, 2013) hasta aplicaciones en biomedicina (Alshatwi et al., 2015).

5.3.1. Tipos de nanopartículas

Las nanopartículas se clasifican en un amplio grupo dependiendo de sus propiedades físicas, químicas o morfológicas (Li et al., 2011), estos son los principales grupos:

5.3.1.1.Orgánicas.

Están formadas por materiales tales como polímeros, bicapas lipídicas, estructuras repetitivas, entre otros. Algunos tipos de nanopartículas dentro de este grupo son:

- Dendrímeros.
- Liposomas.
- Micelas.
- Peptídicas.

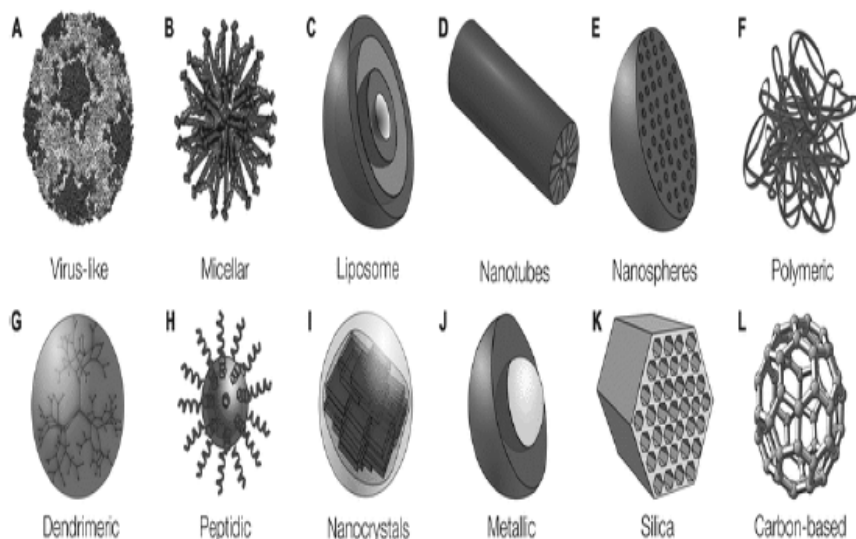
5.3.1.2.Inorgánicas.

Están formados por metales y materiales inertes como el dióxido de titanio, la hidroxiapatita o la sílice. Algunos tipos de nanopartículas dentro de este grupo son:

- Nanopartículas de oro.
- Nanopartículas de óxido de hierro
- Nanotubos de carbono.
- Nanopartículas de óxido de cobre.

- Nanopartículas poliméricas.
- Nanopartículas de sílice.

Figura 6. Diferentes tipos de nanopartículas.



Fuente: Li, X., Xu, H., Chen, Z. S., & Chen, G. (2011). Biosynthesis of nanoparticles by microorganisms and their applications. *Journal of Nanomaterials*.

5.3.2. Nanopartículas de Sílice

Este tipo de nanopartículas son las que tienen importancia dentro de la investigación, por lo que ahora se profundizará un poco en las mismas.

La sílice es el segundo elemento más abundante en la tierra y está presente en casi todos los minerales que se encuentran en la superficie de la tierra (Tubaña & Heckman, 2015). La sílice había sido usada desde la antigüedad solo como adsorbente, pero debido a la nanotecnología hoy por hoy ha tenido un impacto tremendo en sus aplicaciones. Las nanopartículas de sílice por su pequeño tamaño y gran superficie tienen inmensas e

innumerables aplicaciones tecnológicas en casi todos los campos (Rahman & Padavettan, 2012).

5.3.3. *Síntesis de nanopartículas*

Existen 2 grupos en los que se clasifican los diversos procesos de síntesis de nanopartículas.

5.3.3.1. Procesos top-down.

Este tipo de proceso requiere la descomposición de materiales sólidos en pedazos pequeños mediante la aplicación de fuerzas externas. En este enfoque, se utilizan muchas técnicas físicas, químicas y térmicas para proporcionar la energía necesaria para la formación de nanopartículas, este enfoque es más costoso y es imposible obtener superficies y bordes perfectos debido a las cavidades y rugosidades que pueden ocurrir durante el proceso en las nanopartículas.

5.3.3.2. Procesos bottom-up.

Este tipo de procesos se basan en reunir y combinar átomos o moléculas de diversos gases o líquidos para lograr las nanopartículas deseadas, en este enfoque no se forman materiales de desecho que deban eliminarse, y se pueden obtener nanopartículas de menor tamaño gracias a un mejor control en el proceso de formación.

5.3.4. *Síntesis verde de nanopartículas*

Dentro de este último grupo de procesos de síntesis encontramos la síntesis verde o ambientalmente amigable de nanopartículas, este tipo de síntesis destaca debido a sus bajos costos, fácil implementación y bajo impacto, por lo que el método biológico representa una alternativa viable a los tradicionales métodos físicos y químicos

(Nadaroglu et al., 2017); en este método se pueden implementar diferentes tipos de organismos tales como: bacterias, actinobacterias, levaduras, mohos, algas y plantas.

Las moléculas, como proteínas, enzimas, compuestos fenólicos, aminas, alcaloides y pigmentos, realizan la síntesis de nanopartículas por reducción en las plantas y los microorganismos (Shah et al., 2015).

5.3.4.1. Síntesis verde de nanopartículas de Sílice.

Si bien existen diversos métodos para la síntesis de nanopartículas de sílice, entre los que destacan el proceso de Stöber (Ibrahim et al., 2010), el método sol-gel (Thuc & Thuc, 2013), y el método modificado de micro emulsión (Nooney et al., 2015), no son rentables y generan un alto impacto, por lo que es fundamental establecer un método alternativo y económico para la síntesis de las nanopartículas.

Se encontró un método de síntesis verde de nanopartículas de sílice aplicado en la Universiti Malaysia Terengganu mediante extracción y precipitación usando el bagazo de la caña de azúcar como materia prima debido a la alta concentración de sílice que se presenta en la planta (Mupa et al., 2015), dicho método representa una oportunidad óptima dentro de la investigación debido al proceso de retroalimentación que se puede dar entre el objeto de estudio y la fuente de las nanopartículas.

5.4. Zona de muestreo

Piedecuesta es un municipio del departamento de Santander, Colombia. Se encuentra a 17 km de Bucaramanga, formando parte de su área metropolitana. Su extensión territorial es de 344 km²; se observa una alterada geografía que presentan una variada climatología, la agricultura es el principal pilar de la economía de Piedecuesta.

Debido a la variedad de los pisos térmicos, existe diversidad de productos. En la parte alta se cultiva el maíz, la arveja, el trigo, la cebolla, las hortalizas, la arracacha, distintos pastos, verduras y algunos árboles frutales. La parte baja es rica en caña de azúcar, tabaco y plátano. En la parte templada se cultiva yuca, tomate, caña y tabaco. Los productos básicos de la economía de Piedecuesta son la caña de azúcar y el tabaco (Alcaldía Municipal de Piedecuesta, 2019).

Sin embargo, la producción de caña de azúcar se ha visto afectada en el municipio, cosas como la liquidación de la Corporación de Panela de Piedecuesta conocida como Coopanelas y la compra constante de los predios que anteriormente estaban llenos de cañaduzales por parte de constructoras para la edificación de conjuntos residenciales o apartamentos (Porrás Pico, 2018) han orillado a muchos campesinos a cesar su producción afectando sus ingresos y los de sus familias, agudizando una crisis social ya presente.

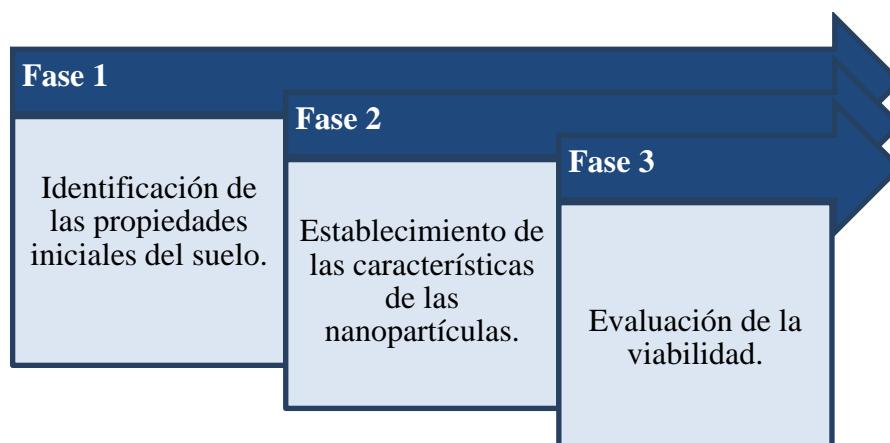
Por si lo anterior no fuera poco se suma a la problemática las irregularidades respecto a la venta del producto, los autores intermediarios pagan a los productores precios que están por debajo del umbral de ganancia en promedio los productores reciben 30.000 pesos por las cajas de panela, mientras que producirlas puede llegar a costar hasta 35.000 pesos.

6. METODOLOGÍA

Para realizar el presente proyecto y evaluar la viabilidad de la aplicación de nanopartícula de sílice, se identificaron las propiedades del suelo proveniente de un cultivo de caña de Piedecuesta Santander y se analizó la viabilidad del uso de las nanopartícula de Sílice con respecto a otras nanopartícula, se desarrolló una investigación dividida en 3 fases, estructuradas de tal forma que permitieron alcanzar cada uno de los objetivos propuestos como se evidencia en los Diagramas 1 al 4 que son explicados con más detalle por medio de la Tabla 5.

El proyecto conto con 3 fases presentadas en el Diagrama 1, en la primera fase se analizaron los datos de la caracterización fisicoquímica del suelo de la finca “San Francisco” que contiene cultivos de caña de azúcar en el municipio de Piedecuesta. En la fase segunda, se establecieron las características de las nanopartículas, se evaluaron varias nanopartículas para poder compararlas con respecto a las nanopartículas del Sílice sugeridas en el presente proyecto. Finalmente se evaluó la viabilidad de las nanopartículas de Sílice en aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos.

Diagrama 1. Fases del proyecto.



Fuente: Autor.

Para la finca “San Francisco” que produce caña de azúcar en el municipio de Piedecuesta, fueron facilitados los datos de análisis fisicoquímico del suelo. Las propiedades analizadas fueron Textura, pH, CIC, Materia Orgánica, Carbono Orgánico, macro y micronutrientes del suelo como: Calcio, Nitrógeno, Magnesio, Aluminio, Sodio, Azufre, Boro, Cobre y Zinc. Las actividades realizadas en la primera fase están presentadas en el Diagrama 2.

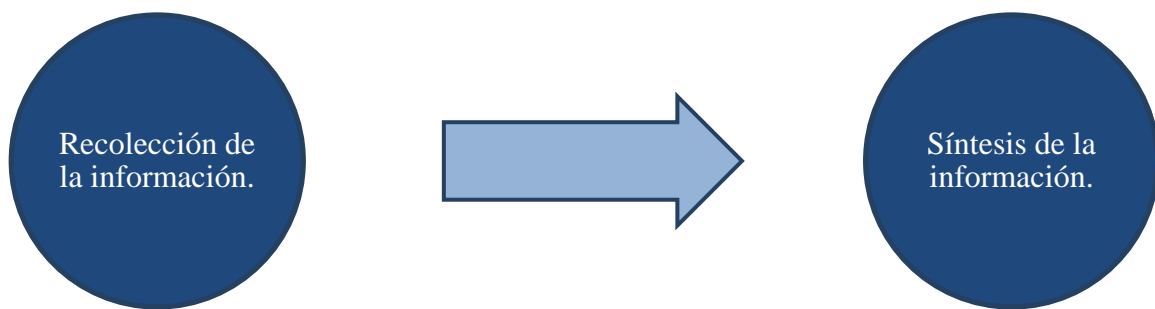
Diagrama 2. Actividades primera fase.



Fuente: Autor.

Para la realización de la segunda fase, se compararon diferentes propiedades de las nanopartículas que podían ser aplicadas, en comparación con las nanopartículas de Sílice. Entre las nanopartículas evaluadas estaban: las de Zinc, Oro, Plata y Cobre, las actividades de la segunda fase se encuentran en el Diagrama 3.

Diagrama 3. Actividades segunda fase.



Fuente: Autor.

En la última etapa se analizó la viabilidad técnica, ambiental, social y económica para la aplicación de nanopartícula de Sílice en suelos de cultivo de caña en el municipio de Piedecuesta, basados en el análisis de las propiedades de un suelo de cultivo de caña en conjunto con las propiedades de las nanopartículas, el Diagrama 4 evidencia las actividades de la tercera fase.

Diagrama 4. Actividades tercera fase.



Fuente: Autor.

Tabla 5.

Diseño metodológico.

Objetivo Especifico	Actividad que se realizó	Objetivo de la actividad	Proceso que se desarrolló
Fase 1 – Identificación de las propiedades iniciales.			
Identificar las propiedades fisicoquímicas en el suelo del cultivo de caña en el municipio de Piedecuesta en Santander.	Se inspeccionó la zona de estudio.	Determinar si se cuenta con información previa sobre las propiedades en el lugar de estudio.	Se realizó un sondeo en la zona de estudio para captar toda la información sobre las propiedades.
	Se identificó las propiedades iniciales del suelo.	Identificar las propiedades iniciales del suelo.	Se plasmó la información obtenida clara y concisamente.
Fase 2 – Establecimiento de las características de las nanopartículas.			
Establecer una comparativa entre las características de las nanopartículas de Sílice y algunas de las principales nanopartículas usadas en campo.	Se recolecto la información.	Recolectar la información necesaria para su futuro análisis.	Se buscó en internet, y se consultó en las fuentes primarias de información.
	Se sintetizó la información.	Sintetizar la información obtenida previamente.	Se resumió de manera precisa la información obtenida.
Fase 3 – Evaluación de la viabilidad.			
Evaluar la viabilidad para la aplicación de nanopartículas de Sílice que mejoren las propiedades fisicoquímicas en el suelo del cultivo de caña.	Se revisó la literatura académica referente al tema.	Establecer la existencia de estudios previos en la aplicación de nanopartículas en el campo agrícola.	Se usaron criterios de búsqueda concretos para encontrar los estudios más relevantes.
	Se evaluó la viabilidad en la aplicación.	Evaluar la viabilidad en la aplicación de las nanopartículas en nuestra zona de estudio.	Se estableció un paralelo entre los estudios encontrados y la zona de estudio y se determinó si es replicable y además viable.

Fuente: Autor.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Identificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Para sentar las bases del análisis en la viabilidad en la aplicación de nanopartículas de sílice para el mejoramiento de la calidad del suelo del cultivo de caña de azúcar en el municipio de Piedecuesta en Santander se hizo necesaria la determinación de las propiedades fisicoquímicas de la zona de estudio.

7.1.1. Análisis de suelo de la zona de interés en Piedecuesta.

El análisis del suelo fue realizado por el laboratorio META (MEJORAMIENTO DE TIERRAS AGRÍCOLAS) para la finca “San Francisco” con cultivos de caña de azúcar en el municipio de Piedecuesta, este análisis que se presenta en la Tabla 6 fue de carácter completo, determinando las propiedades fisicoquímicas y logrando así obtener una caracterización más precisa sobre la zona en la que se realizó el proyecto.

Tabla 6.

Análisis fisicoquímico del suelo de la finca “San Francisco”.

Análisis	Unidad de medida	Resultados	Niveles Normales
Textura	-	Franco Arcilloso	Franco
pH	-	5.4	5.5 – 6.5
CIC	Meq/100 g	68	15 – 30
Materia Orgánica (MO)	%	2.0	3 – 5
Carbono Orgánico (C)	%	1.1	1.70 – 2.90
Nitrógeno Total (NT)	%	0.10	0.15 – 0.25
Fosforo Asimilable (P)	ppm	16.3	15 – 30
Potasio Soluble (K)	Meq/100 g	0.12	0.15 – 0.30

Calcio (Ca)	Meq/100 g	11.0	3 – 6
Magnesio (Mg)	Meq/100 g	4.5	1.50 – 2.50
Aluminio (Al)	Meq/100 g	-	0
Sodio (Na)	Meq/100 g	-	Menor de 1
Azufre (S)	ppm	-	15 – 30
Hierro (Fe)	ppm	185	10 – 20
Manganeso (Mn)	ppm	2.0	5 – 10
Boro (B)	ppm	0.11	0.20 – 0.60
Cobre (Cu)	ppm	0.80	1 – 3
Zinc (Zn)	ppm	6.2	2 – 4

Fuente: (META)

El suelo de la zona de análisis del proyecto es de tipo franco con dominio de arcilla, presenta un pH ligeramente ácido con un valor de 5.4 respecto a los niveles normales para suelos de cultivo de caña y presenta un bajo porcentaje de materia orgánica con un valor de 2.0% estando por debajo de los niveles reportados como normales de 3% encontrados en la Tabla 6.

Además, se observa en la caracterización del suelo un nivel medio de calcio con 11.0 Meq/100 g, así como un alto nivel de Magnesio con 4.5 Meq/100 g, en comparación con los valores normales de la Tabla 6, sin embargo, la relación de estos dos iones presentes en el Intercambio Catiónico del suelo se encuentra equilibrada con un valor de 2.44.

En el análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo de la finca “San Francisco” también se presentan un contenido medio de fósforo asimilable (disponible) con un valor de 16.3 ppm entrando en los rangos normales presentes en la Tabla 6. Así

mismo el análisis arrojó que el potasio soluble en el suelo de la finca con un valor de 0.12 Meq/100 g está por debajo de los rangos normales que se evidencian en la Tabla 6.

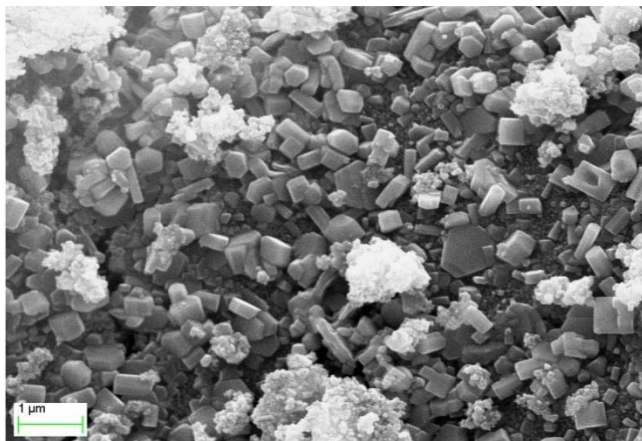
Adicionalmente este suelo presentó limitaciones de algunos microelementos como Manganeso, Boro y Cobre con valores de 2.0, 0.11 y 0.80 ppm respectivamente, con excepciones para el Zinc con 6.2 ppm y el Hierro. Este último presentó altos niveles con un valor 185 ppm excediendo el rango normal de 10 – 20 ppm por lo que el suelo requiere un control que permita normalizar estos valores.

7.2. Características de las nanopartículas.

Una comparativa de las características de las nanopartículas más destacadas usadas en campo con las nanopartículas de Sílice fue necesaria para la contextualización en la aplicación en el suelo analizado en la finca “San Francisco”; para ello se requirió una caracterización general de las nanopartículas de Sílice y de algunas usadas previamente en cultivos entre las se encuentran las de Zinc, Oro, Plata y Cobre.

7.2.1. *Nanopartículas de Zinc*

El zinc es un elemento ubicado en el grupo 12 de la tabla periódica, dentro de los metales de transición, con un número atómico de 30 y su símbolo químico es el Zn, es considerado un elemento químico esencial, en la Figura 7 se observan algunas nanopartículas de Zinc además de su caracterización en la Tabla 7.

Figura 7. Nanopartículas de Zinc.

Fuente: Khatami, M., Alijani, H. Q., Heli, H., Sharifi, I. (2018) Rectangular shaped zinc oxide nanoparticles: green synthesis by Stevia and its biomedical efficiency. *Ceramics International*

Tabla 7.

Caracterización nanopartículas de Zinc.

Morfología	Tamaño	Principales usos
Presentan una morfología mayoritariamente rectangular y, en algunos casos, con formas cuadradas, octagonales con una estructura policristalina hexagonal.	Tamaño promedio de 50 nm.	Aplicaciones en electrónica transparente, emisores de luz ultravioleta (UV), dispositivos piezoeléctricos, sensores químicos y espintrónica.

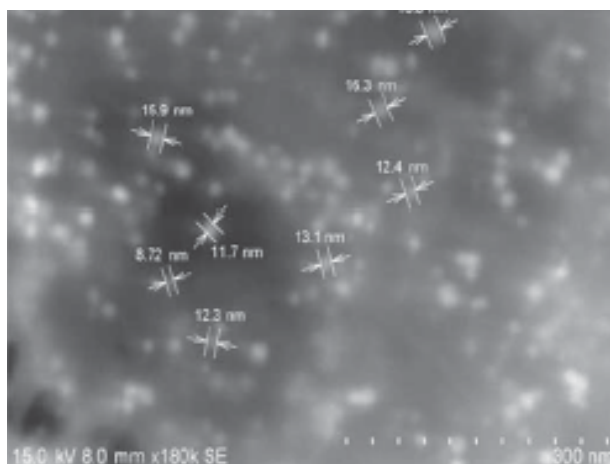
Fuente: Autor.

7.2.2. Nanopartículas de Plata

La plata es un elemento ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica, dentro de los metales de transición, con un número atómico de 47 y su símbolo químico es el Ag, además es considerado un metal precioso, en la Tabla 8 se puede apreciar la

caracterización de las nanopartículas de Plata y en la Figura 8 se observan algunas de estas nanopartículas.

Figura 8. Nanopartículas de Plata.



Fuente: Mukundan, D., Mohankumar, R., Vasanthakumari, R. (2017) Comparative study of synthesized silver and gold nanoparticles using leaves extract of *Bauhinia tomentosa* Linn and their anticancer efficacy. *Bulletin of Materials Science*

Tabla 8.

Caracterización nanopartículas de Plata.

Morfología	Tamaño	Principales usos
Se observan típicamente partículas esféricas polidispersas con una estructura nano-cristalina del tipo cúbico centrado en las caras.	Tamaño promedio de 18.45 nm.	Alta eficacia antimicrobiana contra bacterias, virus y otros microorganismos eucariotas.

Fuente: Autor.

7.2.3. Nanopartículas de Oro

El oro es un elemento ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica, dentro de los metales de transición, con un número atómico de 79 y su símbolo químico es el Au, al

igual que la Plata el Oro también es considerado un metal precioso, la Figura 9 presenta ciertas nanopartículas de Oro y en la Tabla 9 encontramos su caracterización.

Figura 9. Nanopartículas de Oro.



Fuente: Mukundan, D., Mohankumar, R., Vasanthakumari, R. (2017) Comparative study of synthesized silver and gold nanoparticles using leaves extract of *Bauhinia tomentosa* Linn and their anticancer efficacy. *Bulletin of Materials Science*

Tabla 9.

Caracterización nanopartículas de Oro.

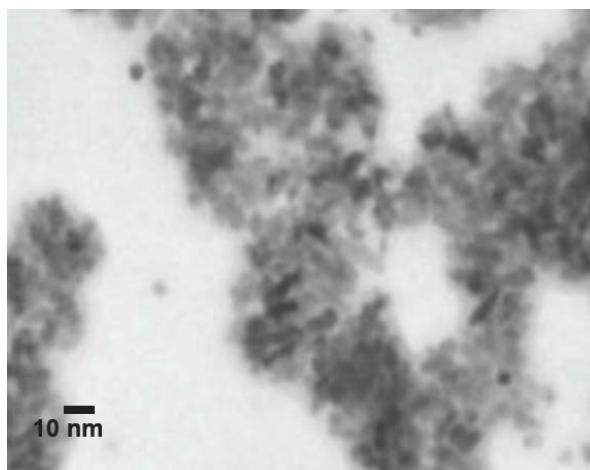
Morfología	Tamaño	Principales usos
Al igual que en las nanopartículas de plata, las de oros presentan una estructura completamente similar tanto en su forma como en su estructura cristalina.	Tamaño promedio de 27.8 nm.	Tratamiento del cáncer, terapia génica y sistemas de administración de fármacos.

Fuente: Autor.

7.2.4. Nanopartículas de Cobre

El cobre es un elemento ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica, dentro de los metales de transición, con un número atómico de 29 y su símbolo químico es el Cu, es uno de los mejores conductores de electricidad, la Tabla 10 presenta su caracterización y en la Figura 10 se pueden observar ciertos aglomerados de las nanopartículas de Cobre.

Figura 10. *Nanopartículas de Cobre.*



Fuente: Giannini, C., Siliqi, D., Altamura, D., Sibillano, T. (2015) Estudio morfológico y estructural de nanopartículas de CuO empleando técnicas de dispersión de luz y rayos x.

Tabla 10.

Caracterización nanopartículas de Cobre.

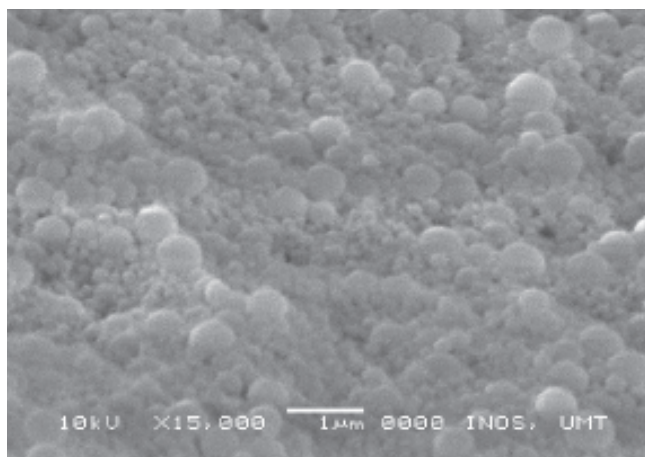
Morfología	Tamaño	Principales usos
Usualmente forman aglomerados esféricos o cúmulos largos, la estructura cristalina de estas nanopartículas es del tipo monoclinica centrada en las bases.	Tamaño promedio de 8 nm.	Aplicaciones catalíticas, fotocatalíticas y energéticas.

Fuente: Autor.

7.2.5. Nanopartículas de Sílice

El silicio es un elemento ubicado en el grupo 14 de la tabla periódica, dentro de los metaloides, con un número atómico de 14 y su símbolo químico es el Si. La Figura 11 presenta el resultado final de la síntesis verde de nanopartículas de sílice usando el bagazo de caña y en la Tabla 11 se evidencia su caracterización.

Figura 11. *Nanopartículas de Sílice.*



Fuente: Mohd, N., Wee, N., Azmi, A. (2017) Green synthesis of silica nanoparticles using sugarcane bagasse. AIP Conference Proceedings.

Tabla 11.

Caracterización nanopartículas de Sílice.

Morfología	Tamaño	Principales usos
Generalmente en el proceso de síntesis verde se obtienen nanopartículas con una morfología mayoritariamente esférica y con una estructura amorfa.	Tamaño promedio de 30 nm.	Las propiedades únicas de las nanopartículas de silicio tienen aplicaciones útiles en diferentes sectores, incluidas aplicaciones prometedoras en el sector agrícola, tales como hacer frente a los daños agrícolas que pueden

producirse por el cambio climático y el estrés abiótico.

Fuente: Autor.

7.2.6. *Análisis de afinidad de las nanopartículas*

Una vez establecidas las características de las nanopartículas se establece la afinidad de estas con el cultivo de caña, usando criterios como el tamaño y el requerimiento de nutrientes que fortalezcan a las plantas del propio cultivo. En la Tabla 12 se analizó un resumen de las características de las nanopartículas y su afinidad con el cultivo.

Tabla 12.

Análisis de la afinidad de las nanopartículas con el cultivo de caña.

Tipo de nanopartícula	Tamaño	Morfología	Aplicaciones	Afinidad con el cultivo de caña
Zinc	50 nm	Rectangular	Ver Tabla 6	Alta
Plata	18.45 nm	Esférica	Ver Tabla 7	Baja
Oro	27.8 nm	Esférica	Ver Tabla 8	Baja
Cobre	8 nm	Cúmulos	Ver Tabla 9	Media
Sílice	30 nm	Amorfa	Ver Tabla 10	Muy Alta

Fuente: Autor.

Analizando los resultados de la caracterización del suelo de la Finca “San Francisco” y en complemento con las características de las nanopartículas presentes en la tabla 12 se encontró lo siguiente:

- Las nanopartículas de Plata y Oro se han usado previamente en otros cultivos como el de palma de aceite (Bohorquez Gonzales & Martinez Gomez, 2018), presentan

una baja afinidad con el suelo del cultivo de caña, ya que no hacen parte de los nutrientes necesarios para el cultivo, no presentan un tamaño adecuado y además se desconoce los efectos fitotóxicos que pueden tener en el cultivo de caña.

- En cuanto a las nanopartículas de Cobre, si bien hace parte de los requerimientos nutricionales del cultivo de caña de azúcar presentan un tamaño demasiado pequeño restringiendo parte de los posibles usos que se le pueden dar en el cultivo, presentando una afinidad media.

- Por otra parte, las nanopartículas de Zinc presentan una afinidad alta, ya que además de hacer parte de los nutrientes necesarios tiene un tamaño mayor que las anteriores, sin embargo, su forma no es la más adecuada, además el suelo del cultivo de la finca San Francisco como se evidencia en la Tabla 6 presenta una concentración ligeramente mayor a la normal de Zinc, por lo que el uso de estas nanopartículas podría aumentar aún más la presencia de este elemento en el suelo.

- Finalmente, las nanopartículas de Sílice presentan una afinidad muy alta ya que poseen un tamaño óptimo para su aplicación en el suelo, además su aplicación no representa un riesgo para el suelo o el cultivo y la forma que tienen ofrece una mayor relación de superficie aumentando el abanico de usos que se le pueden dar a estas.

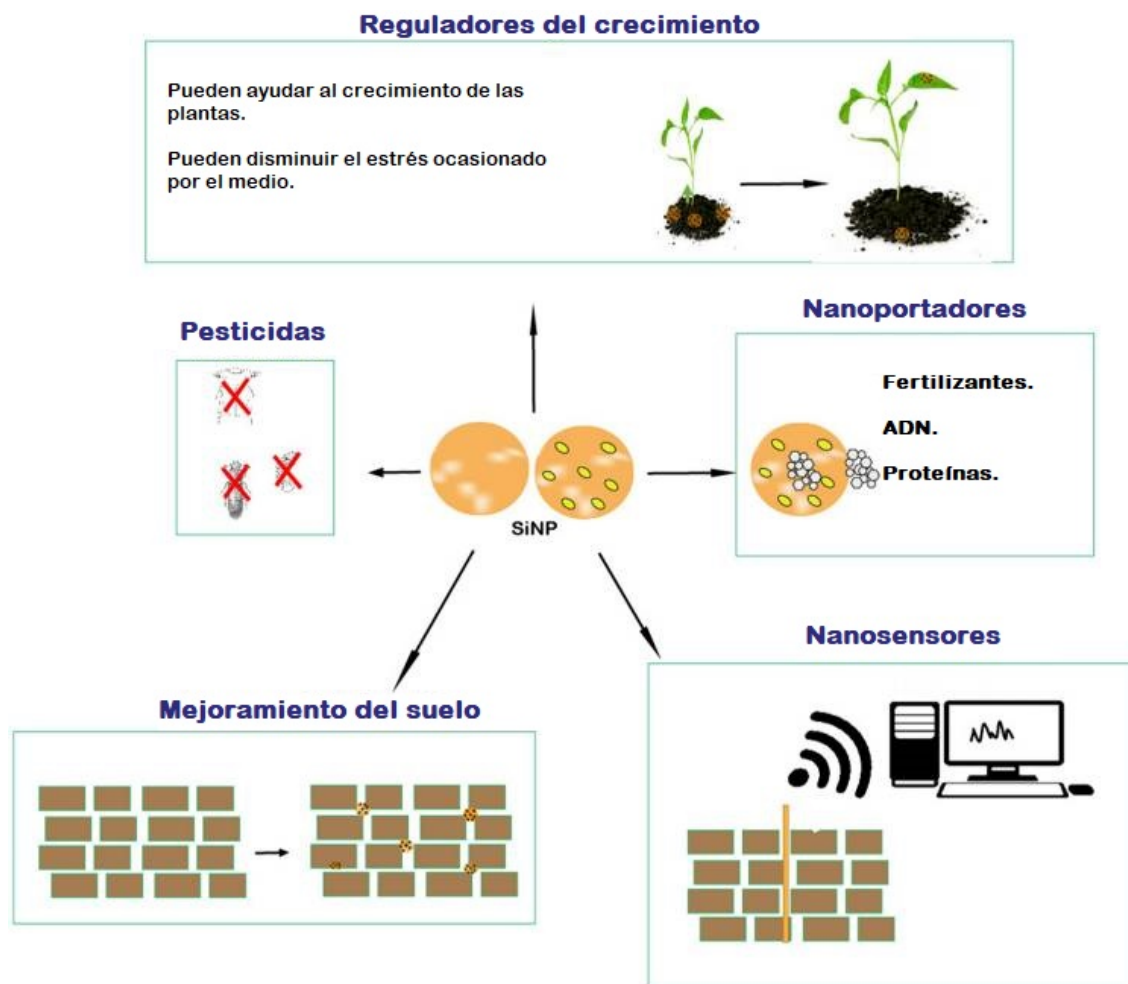
7.3. Viabilidad de las nanopartículas de Sílice

Después de establecida la afinidad muy alta de las nanopartículas de sílice con el suelo del cultivo de caña de la finca “San Francisco” se presentan los factores que la hacen viable para su aplicación además de los características por los cuales destaca sobre

las demás nanopartículas, entre los factores de viabilidad encontramos: su facilidad para ser sintetizada incluyendo métodos de síntesis verde (Mohd et al., 2017), su prácticamente inocuidad para las plantas ya que solo en niveles excesivamente altos de sílice se puede ver afectada la absorción de otros nutrientes, además de que en el caso particular de la caña de azúcar se considerada como acumuladora de Sílice con aproximadamente 1.5% de acumulación en sus tejidos (Bloodnick, 2021) y su versatilidad.

Adicionalmente en el análisis de viabilidad de las nanopartículas de Sílice para el cultivo de caña se encontró que existen múltiples aplicaciones agrícolas, como se observa en la figura 12.

Figura 12. Aplicaciones agrícolas de las nanopartículas de Sílice.



Fuente: Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N. I., & Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*, 9(3), 90.

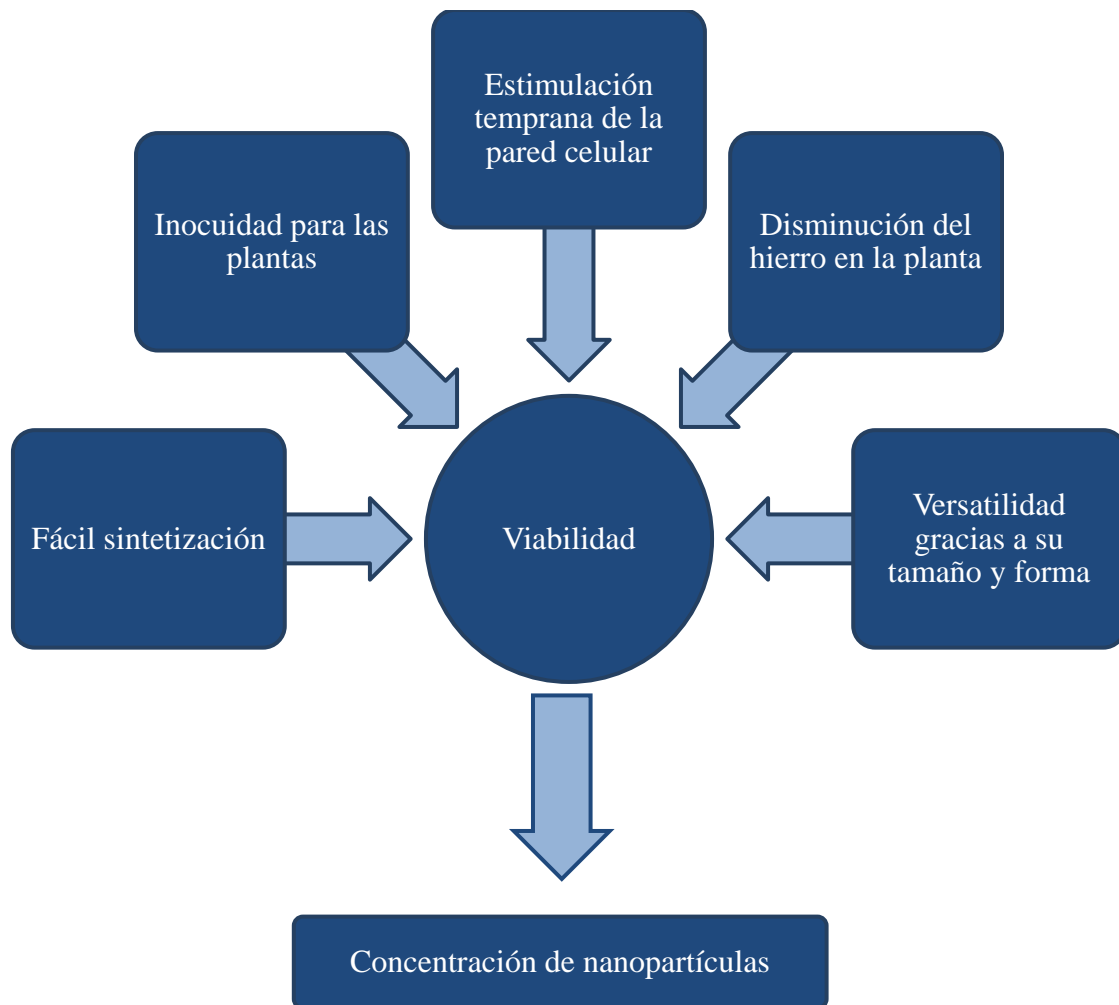
Sin embargo, con lo reportado en las Tabla 4 y 6 respectivamente, se encuentran niveles altos de hierro en la zona de interés, y debido a este exceso es cuando entra en juego la capacidad más importante que tienen las nanopartículas de sílice para este estudio y es su capacidad para interactuar con las paredes celulares de la planta formando una temprana banda de Caspary cuya función es impermeabilizar la pared,

impidiendo que las sustancias entren en las células de la endodermis y ectodermis.

Además, las células están unidas entre sí por las bandas con lo que también imposibilitan el paso de sustancias entre ellas (Geldner, 2013). Y disminuyendo así la concentración de hierro sin importar cual sea la fuente del mismo (Becker et al., 2020).

También se analizó en la literatura que debido a que las nanopartículas de Sílice tienen un tamaño más pequeño, mayor relación superficie-peso y a la variedad de formas que poseen, pueden ofrecer ciertas ventajas sobre las fuentes tradicionales de sílice en cuanto a la mitigación de diferentes tensiones abióticas (Rastogi et al., 2019).

En el Diagrama 5 se sintetizó la información analizada para las nanopartículas de sílice y permite identificar claramente los diferentes factores que poseen las nanopartículas en cuestión, que logran establecer la viabilidad en la aplicación de estas nanopartículas en los suelos del cultivo de caña de azúcar. Finalmente se estableció el paso a seguir para que este análisis teórico de viabilidad pueda ser implementado en el laboratorio.

Diagrama 5. Factores de viabilidad de las nanopartículas de Sílice.

Fuente: Autor

En la Tabla 13 se presenta un análisis adicional a la viabilidad técnica presentada anteriormente, comprendido por una dimensión económica, ambiental y social de la aplicación de estas nanopartículas de Sílice, debido a la falta de una legislación que regule el tema en nuestro país (Santana Cabello & Gañán Rojo, 2019) una viabilidad legal no fue posible.

Tabla 13.

Viabilidades adicionales de las partículas de Sílice.

Viabilidad Económica	Viabilidad Ambiental	Viabilidad Social
<p>La utilización de bagazo de caña como precursor de las nanopartículas de Sílice dentro de la futura aplicación en el cultivo, permite el acceso fácil de los campesinos a esta tecnología, ya que se evita la compra y utilización de otros agentes precursores más costosos en el mercado que pueden llegar a costar hasta 200 dólares, como se evidencia en una de las plataformas más grande de materiales de laboratorio Sigma-Aldrich® de Merck, además de añadir un valor agregado a los residuos del propio cultivo por lo que presenta una viabilidad económica.</p>	<p>Los efectos que pueden tener las nanopartículas de Sílice en el medio ambiente aún están en estudio, sin embargo, tienen una muy baja reactividad por lo que su impacto en el ecosistema puede ser mínimo, en la Ficha de Datos de Seguridad para las nanopartículas de Sílice de la compañía NANOSHEL, se clasifican como material no peligroso, además de completamente estable y no soluble en agua, lo que impediría su paso al agua subterránea y sin impacto ecológico negativo presenta una viabilidad ambiental positiva.</p>	<p>Una mejora en los cultivos de caña de azúcar gracias a la aplicación de las nanopartículas de Sílice se traduce en un mejoramiento de la calidad de vida de los campesinos dedicados a este cultivo en Piedecuesta, y podría incentivar a campesinos que habían dejado de ejercer esta actividad económica debido a las diversas dificultades a volver al cultivo; blindando contra la amenaza de desaparecer completamente del panorama una actividad tan representativa para el municipio.</p>

Fuente: Autor

Después de establecida la viabilidad en la aplicación de las nanopartículas de sílice, se hace necesario explorar formas de aplicación de estas nanopartículas para

determinar cuál es la concentración que ofrecería los mejores resultados. Para ejecutar en el laboratorio se considera una aplicación directa en el suelo en un rango de concentraciones desde 50 ppm hasta 200 ppm con un intervalo de 50 ppm entre cada una de estas aplicaciones además de un control con una concentración de 0 ppm. El esquema de aplicación se evidencia a continuación:

7.3.1. Diseño Experimental para aplicar las nanopartículas de Sílice en el laboratorio

El diseño experimental propuesto para la determinación de la concentración de las nanopartículas de sílice se basaría en cuadrantes. Cada uno de los cuadrantes contaría con parámetros constantes y variables, como se puede apreciar en la Tabla 13:

Tabla 14.

Parámetros de los cuadrantes de suelo.

Parámetros	
Variable	Nanopartículas de Sílice (concentración)
Constantes	Tipo de suelo.
	Condiciones ambientales.
Respuesta	pH.
	Materia orgánica.
	Macro y Micronutrientes.
	Conductividad eléctrica.
	Intercambio catiónico.

Fuente: Autor.

Para los cuadrantes de suelo la variable que se evaluaría serían las concentraciones de las nanopartículas de sílice, ya que se pretende determinar cómo estas inciden en las propiedades del suelo y de la planta, estas propiedades fueron previamente

establecidas con el análisis total del suelo de la Tabla 6. El tipo de suelo, así como las condiciones ambientales se mantendrían constantes para evitar fluctuaciones que conlleven a errores no deseados a la hora de medición.

Con el fin de realizar un análisis comparativo de los resultados, el diseño empleado sería unifactorial, se tendría un factor que en este caso son las nanopartículas que se presenta en diferentes niveles de concentración, aplicadas a las unidades experimentales; los cuadrantes del suelo, además se pretendería hacer una réplica de cada cuadrante para disminuir el error aleatorio. En la Tabla 14 se presentan el factor y los niveles para el análisis del cambio en las condiciones de los cuadrantes del suelo.

Basado en las variables seleccionadas, el diseño experimental de los cuadrantes consistiría en el estudio del factor a 4 niveles. La matriz comprende 4^k filas y k columnas, que corresponden al factor seleccionado con un cuadrante adicional para el control.

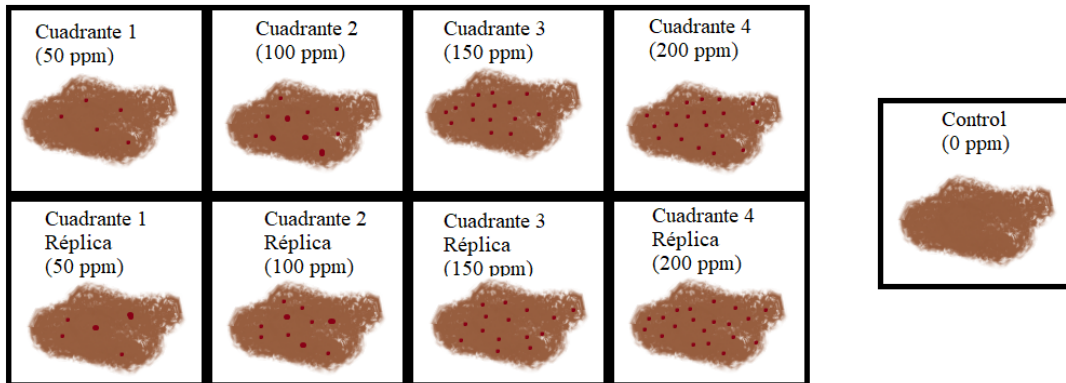
Tabla 15.

Diseño experimental de los cuadrantes.

Cuadrante	Nanopartículas
1	Concentración 1 (50 ppm)
2	Concentración 2 (100 ppm)
3	Concentración 3 (150 ppm)
4	Concentración 4 (200 ppm)
1 (R)	Concentración 1 (50 ppm)
2 (R)	Concentración 2 (100 ppm)
3 (R)	Concentración 3 (150 ppm)
4 (R)	Concentración 4 (200 ppm)
Control	Concentración Control (0 ppm)

R = Replica. Fuente: Autor.

Figura 13. Representación gráfica de los cuadrantes.



Fuente: Autor.

Este diseño experimental que se enfoca en un análisis por cuadrantes y sus réplicas permitiría establecer cuál es la concentración óptima de las nanopartículas de sílice, ya que parte de la premisa establecida en este proyecto, es decir la viabilidad en la aplicación de las nanopartículas de sílice para el cultivo de caña en Piedecuesta y la complementaria con un valor exacto, que se aplicaría a los tratamientos con dichas nanopartículas, por eso es de vital importancia dejar sentado este método para futuros estudios en la viabilidad de las nanopartículas de sílice.

8. CONCLUSIONES

En este proyecto se logró analizar y se identificaron las propiedades fisicoquímicas del suelo del cultivo de caña para la zona de interés en el municipio de Piedecuesta en Santander. El análisis de suelos de la finca de San Francisco arroja resultados con unas concentraciones ligeramente altas de Calcio, Magnesio y Zinc, una concentración excesiva de Hierro, y ciertas deficiencias en materia orgánica y Potasio presentando debilidades para el cultivo de caña, requiriendo un mejoramiento del mismo.

Se estableció una comparativa en base a las características de algunas de las nanopartículas usadas previamente en cultivos y el análisis de afinidad en base a dichas características además del aporte que ofrecían al suelo cultivo de caña estableció que las nanopartículas de sílice exhiben una facilidad para ser sintetizadas permitiendo una rápida implementación en el cultivo de caña de azúcar. Adicionalmente las nanopartículas de sílice presentaron según el análisis una alternativa viable para la aplicación en los suelos con alto contenido de hierro como los se presentan en la zona de interés.

De igual forma las nanopartículas de sílice presentan mayor viabilidad en el suelo porque aumentan mediante una estimulación temprana de la pared celular la resistencia natural del cultivo al estrés ocasionado por factores abióticos del medio, protegiendo al cultivo de caña ante amenazas que puedan afectar la productividad, además de presentar una viabilidad económica, ambiental y social positiva.

En el proyecto se presentó una metodología propuesta para estudiar la viabilidad que se culminó de manera exitosa, permitiendo finalmente establecer la viabilidad de las nanopartículas de sílice. Adicionalmente se presentó un diseño experimental que permite evaluar diferentes concentraciones de las nanopartículas de sílice sentando las bases para futuros estudios con esta nanopartícula.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda socializar los posibles beneficios sobre el cultivo de caña de azúcar que traerán las nanopartículas de sílice con los actores involucrados en el proceso.

Se recomienda establecer un proceso cíclico usando el bagazo de caña generado por el cultivo para la síntesis verde de las nanopartículas que se aplicaran posteriormente al mismo.

Se recomienda poner en práctica el diseño experimental presentado para determinar cuál es la concentración optima que se requiera para el cultivo de caña de azúcar.

Se recomienda hacer un seguimiento a largo plazo sobre la forma en que las nanopartículas de sílice impactan en el crecimiento de las plantas.

Se recomienda futuras investigaciones interdisciplinarias para determinar con exactitud la disminución en los niveles del hierro ocasionado por las nanopartículas de sílice en la zona de estudio.

Se recomiendan la aplicación de las nanopartículas junto a esquemas regulares de fertilización del cultivo para lograr una compenetración optima de los dos aspectos.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alcaldia Municipal de Piedecuesta. (2019). *Presentación del Municipio*. 18-Abril-2019.
<http://www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Presentacion.aspx>

Alshatwi, A. A., Athinarayanan, J., & Periasamy, V. S. (2015). Biocompatibility assessment of rice husk-derived biogenic silica nanoparticles for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 47, 8–16.

An, J., Zhang, X., Guo, Q., Zhao, Y., Wu, Z., & Li, C. (2015). Glycopolymer modified magnetic mesoporous silica nanoparticles for MR imaging and targeted drug delivery. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 482, 98–108.

Becker, M., Ngo, N. S., & Schenk, M. K. A. (2020). Silicon reduces the iron uptake in rice and induces iron homeostasis related genes. *Scientific Reports*, 10(1).
<https://doi.org/10.1038/S41598-020-61718-4>

Bloodnick, E. (2021). *Role of Silicon in Plant Culture*.
<https://www.pthorticulture.com/en/training-center/role-of-silicon-in-plant-culture/>

Bohorquez Gonzales, A. M., & Martinez Gomez, J. S. (2018). *Evaluación del porcentaje de recuperación de nanopartículas de plata en suelos de cultivos de palma de aceite*,

utilizando la técnica de lavado Flushing. Universidad Pontificia Bolivariana.

Corpoica. (1998). *Manual de caña de azúcar para la producción de panela.* Corpoica.

Espinal, C., Martínez, H., Pinzón, N., & Barrios, C. (2004). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: Observatorio Agrocadenas Colombia. *Documento de Trabajo*, 47, 8.

Fedepanela. (2019). *Fortalecimiento de la competitividad de los productores paneleros, mediante el mejoramiento del cultivo de caña en el departamento de Santander.* (pp. 2–6).

Geldner, N. (2013). The Endodermis. *Http://Dx.Doi.Org/10.1146/Annurev-Arplant-050312-120050*, 64, 531–558. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-050312-120050>

Ibrahim, I. A. M., Zikry, A. A. F., & Sharaf, M. A. (2010). Preparation of spherical silica nanoparticles: Stober silica. *J. Am. Sci*, 6(11), 985–989.

Li, X., Xu, H., Chen, Z. S., & Chen, G. (2011). *Biosynthesis of nanoparticles by microorganisms and their applications.* *J Nanomater* 2011: 1–16.

- Lopez, E., & Miñano, F. (2008). *Metodos rapidos de analisis de suelos. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentacion.*
- Manrique, R., & Insuasty, O. (2000). *Programa de procesos agroindustriales. CORPOICA – E. E. CIMPA.*
- Méndez-Vilas, A. (2013). *Microbial pathogens and strategies for combating them: science, technology and education.* Formatex Research Center.
- Mohd, N. K., Wee, N. N. A. N., & Azmi, A. A. (2017). Green synthesis of silica nanoparticles using sugarcane bagasse. *AIP Conference Proceedings, 1885*(September 2017). <https://doi.org/10.1063/1.5002317>
- Mupa, M., Hungwe, C. B., Witzleben, S., Mahamadi, C., & Muchanyereyi, N. (2015). *Extraction of silica gel from Sorghum bicolour (L.) moench bagasse ash.*
- Nadaroglu, H., Alayli, A., & Ince, S. (2017). Synthesis of Nanoparticles by Green Synthesis Method. *International Journal of Innovative Research and Reviews, 1*, 6–9.
- Nooney, R., O’Connell, C., Roy, S., Boland, K., Keegan, G., Kelleher, S., Daniels, S., & McDonagh, C. (2015). Synthesis and characterisation of far-red fluorescent cyanine dye doped silica nanoparticles using a modified microemulsion method for

application in bioassays. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 470–479.

Osorio Cadavid, G. (2007). *Manual técnico: buenas prácticas agrícolas-BPA-y buenas prácticas de manufactura-BPM-en la producción de caña y panela autoría*. FAO.

Porras Pico, E. C. (2018). *Los últimos suspiros de la producción de panela en el municipio de Piedecuesta*. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Unab.
<https://www.periodico15.com/los-ultimos-suspiros-de-la-produccion-de-panela-en-el-municipio-de-piedecuesta/>

Rahman, I. A., & Padavettan, V. (2012). Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: size-dependent properties, surface modification, and applications in silica-polymer nanocomposites—a review. *Journal of Nanomaterials*, 2012.

Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N. I., & Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. In *3 Biotech* (Vol. 9, Issue 3, p. 90). <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>

Santana Cabello, R., & Gañán Rojo, P. (2019). Derecho y nanotecnología: definiendo lo invisible. *Revista de La Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 49(131), 507–520.
<https://doi.org/10.18566/rfdcp.v49n131.a11>

Shah, M., Fawcett, D., Sharma, S., Tripathy, S. K., & Poinern, G. E. J. (2015). Green synthesis of metallic nanoparticles via biological entities. *Materials*, 8(11), 7278–7308.

Thuc, C. N. H., & Thuc, H. H. (2013). Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol–gel method. *Nanoscale Research Letters*, 8(1), 1–10.

Tubaña, B. S., & Heckman, J. R. (2015). Silicon in soils and plants. In *Silicon and plant diseases* (pp. 7–51). Springer.

Vert, M., Doi, Y., Hellwich, K.-H., Hess, M., Hodge, P., Kubisa, P., Rinaudo, M., & Schué, F. (2012). Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). *Pure and Applied Chemistry*, 84(2), 377–410.