



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“Diseño de instrumentación para nanosensores aplicados a fisiología de plantas”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Ing. José Alberto Gómez Elizalde

Director de tesis:

Dr. Josué Ortiz Medina

Codirector:

Dr. Francisco Javier Godínez García

Durango, Dgo. México, marzo, 2024.





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Diseño de instrumentación para nanosensores aplicados a fisiología de plantas

Presenta:

Ing. Jose Alberto Gómez Elizalde

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Josué Ortiz Medina Director	 Firma
Dr. Francisco Javier Godínez García Codirector	 Firma
M.C. Eduardo Gamero Inda Asesor	 Firma

Mc. Norma Alicia García Vidaña

Coordinadora del programa de la Maestría en ingeniería.

Dr. Francisco Javier Godínez García

Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

Durango, Dgo. México

marzo de 2024





Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **11/Abril/2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI/C/049/24.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. JOSÉ ALBERTO GÓMEZ ELIZALDE
No. DE CONTROL G16041278
P R E S E N T E .

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

"DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN PARA NANOSENSORES APLICADOS A FISIOLÓGIA DE PLANTAS"

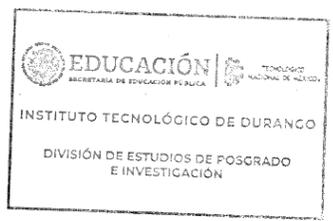
CONTENIDO:

- RESUMEN
- CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN
- CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO
- CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS
- CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- APÉNDICE A
- APÉNDICE B

ATENTAMENTE.

*Excelencia en Educación Tecnológica.
"La Técnica al Servicio de la Patria"*


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG/ammc.



Av. Felipe Pescador #1030 Cte. Col. Nueva Virreyes C.P.34020 Durango, Durango.
Tel. (548) 6299400 e-mail: tecna.mx | itdurango.edu.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **11/Abril/2024**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI/C/050/24.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. JOSÉ ALBERTO GÓMEZ ELIZALDE
No. DE CONTROL C16041278
P R E S E N T E .

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

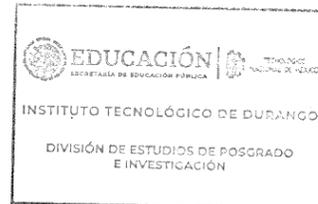
"DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN PARA NANOSENSORES APLICADOS A FISIOLÓGÍA DE PLANTAS"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E .

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica al Servicio de la Patria"


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG'ammc



Av. Felipe Pescador #1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya C.P.34020 Durango, Durango.
Tel. (618) 8290900 e-mail: tecnm.mx | itdurango.edu.mx



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
DIVERSIFICACIÓN E INNOVACIÓN

Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango, en el area de Maestría en Ingeniería., bajo la dirección del Dr. Josué Ortiz Medina.

Durante la realización del presente trabajo de investigación de maestría, el autor recibió una beca académica por parte del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (registro 1177471).

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología por su generoso apoyo financiero, que hizo posible la realización de esta tesis. Así como a el Instituto Tecnológico de Durango por proporcionar la infraestructura y recursos para llevar a cabo esta investigación.

Un profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. Su apoyo incondicional y orientación fueron fundamentales en este viaje académico. Primero a mi familia, cuyo amor y apoyo constante han sido mi fuente de fortaleza. A mi director de tesis, Josué Ortiz Medina, por su dedicación, paciencia y guía experta. Sus valiosos comentarios y sugerencias fundamentales en la realización de este trabajo.

Agradezco a los profesores de la Maestría en Ingeniería por su enseñanza inspiradora y su impacto en mi desarrollo académico. A mis compañeros de estudio, quienes han compartido este viaje conmigo, y aportaron ideas valiosas y proporcionando un entorno de apoyo y colaboración.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado en buenos y malos momentos, brindándome apoyo emocional y buenos momentos. Gracias a todos los que han formado parte de este proyecto. Su contribución ha dejado una huella imborrable en mi vida académica y personal.

Resumen

Los nanosensores son dispositivos compuestos de materiales con estructuras en escala nanométrica, los cuales pueden utilizarse para la detección de moléculas, partículas, campos eléctricos y térmicos entre otra amplia variedad de analitos. Estos dispositivos tienen diferentes áreas de aplicación como lo son la electrónica, la informática, la energía y la medicina, en donde son utilizados para la detección de diversas sustancias y cambios en propiedades físicas. En este trabajo se siguieron diferentes rutas para la elaboración de nanosensores a partir de películas delgadas y nanocompuestos flexibles, a base de dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple. Estos nanosensores muestran una buena conductividad eléctrica, relacionada con las características de la dispersión del nanomaterial en términos de concentración y del tipo de dispersante. El nanosensor desarrollado fue puesto a prueba aplicando deformaciones mecánicas en modelos de plantas, a fin de obtener una relación entre la deformación y el cambio en la conductividad eléctrica. Por medio de la instrumentación electrónica adecuada, se pudieron determinar cambios morfológicos (crecimiento) en plantas, medibles en términos de magnitud y tiempo. La propuesta de nanosensor desarrollada en este trabajo tiene usos prometedores en el área agroindustrial con flexibilidad en el ajuste de sus propiedades, lo cual ayudaría a contribuir a un mejor estudio del crecimiento y otros cambios morfológicos y fisiológicos en plantas de los cultivos en las de las diferentes partes de nuestro estado y nuestro país.

Palabras clave: nanotecnología, nanosensor, aplicaciones agroindustriales, nanoelectrónica.

Abstract

Nanosensors are devices composed of materials structured at the nanoscale, which can be used for the detection of molecules, particles, electric and thermal fields, among others in a wide variety of analytes. These devices find applications in a wide range of areas, such as electronics, computer science, energy, and medicine, where they are used for the detection of various substances and changes in their physical properties. In this work, nanosensors were developed from thin films and flexible nanocomposites, based on dispersions of single-walled carbon nanotubes. These nanosensors show good electrical conductivity, related to the characteristics of the dispersion of the nanomaterial in terms of concentration and the type of dispersant. The developed nanosensor was evaluated by applying mechanical deformations in plant models, to obtain a relationship between morphological (growth) deformation and changes in electrical conductivity. By means of the appropriate electronic instrumentation, morphological changes in plants, measurable in terms of magnitude and time, could be determined. The nanosensor proposal developed in this work has promising uses in the agro-industrial area where it can be modified to adjust its properties and improve its functionality towards, better devices designed to study the growth and other morphological and physiological changes in crop plants in various parts of our state and our country.

Keywords: *nanotechnology, nanosensor, agro-industrial applications, nanoelectronics*

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Delimitación del problema	4
1.7 Estado del arte	5
1.7.1 <i>Aplicaciones de los nanomateriales</i>	5
Capítulo 2 Marco Teórico	8
2.1 Nanotecnología y nanomateriales	8
2.2 Nanosensores.....	12
2.3 Elastómeros utilizados en la creación de nanosensores	15
2.3.1 <i>Alcohol Polivinilico</i>	15
2.3.2 <i>Polidimetilsiloxano</i>	17
Conclusiones	18
Capítulo 3 Materiales y Métodos.....	19
3.1 Preparación de dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs).....	19
3.2 Elaboración de películas resistivas a base SWCNTs	21
3.3 Elaboración de hidrogel resistivo a base de SWCNTs.....	23
3.4 Elaboración de composito para creación de sensores a base de SWCNTs	25
3.5 Diseño y elaboración de la interfaz electrónica para adquisición de señal del nanosensor	26
3.6 Desarrollo de metodología para procesamiento de datos proveniente del nanosensor elaborado	28
3.7 Colocación de sensores para monitoreo en plantas.....	35

Capítulo 4 Resultados y Discusión.....	37
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	52
Referencias.....	56
Apéndice A.....	61
Nomenclatura	61
Información de soporte.....	62
Apéndice B.....	66
Publicación de artículo	66

Índice de figuras

Figura 2. 1: <i>Clasificación de los nanomateriales basados en su composición y dimensión.</i>	9
Figura 2. 2: <i>Formas en las que se puede encontrar el carbono.</i>	11
Figura 2. 3: <i>Modelos moleculares de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs) y de pared múltiple (MWCNTs).</i>	12
Figura 3. 1 <i>Esquemático de la preparación de dispersion de SWCNTs.</i>	20
Figura 3. 2 <i>Esquemático de la preparación de la preparación de la dispersion de SWCNTs en DBSS.</i>	21
Figura 3. 3 <i>Esquemáticos de elaboración de películas de resina de silicio y CNTs.</i>	22
Figura 3. 4 <i>Películas resistivas a base de nanotubos de carbono de pared simple.</i>	22
Figura 3. 5 <i>Elaboración de hidrogel.</i>	23
Figura 3. 6 <i>Elaboración de Hidrogel a base de nanotubos de carbono de pared simple.</i>	24
Figura 3. 7 <i>Composito elaborado a base de las dispersiones de SWCNTs.</i>	25
Figura 3. 8 <i>Moldes para prototipos.</i>	26
Figura 3. 9 <i>Muestras de películas resistivas de resina de silicio.</i>	27
Figura 3. 10 <i>Muestras de hidrogel resistivo.</i>	28
Figura 3. 11 <i>Simulación de circuito.</i>	29
Figura 3. 12 <i>Diagrama de flujo de la interfaz gráfica para el nanosensor.</i>	30
Figura 3. 13 <i>Código a destacar en la interfaz gráfica.</i>	31
Figura 3. 14 <i>Implementación del sensor.</i>	36
Figura 4. 1 <i>Evaluación de resistencia de las dispersiones en sustratos B.</i>	38
Figura 4. 2 <i>Evaluación de resistencia de las dispersiones en sustratos V.</i>	39
Figura 4. 3 <i>Monitoreo de la resistencia en películas de SWCNTs al modificar la temperatura.</i>	40
Figura 4. 4 <i>Hidrogel elaborados con diferentes dispersiones.</i>	42
Figura 4. 5 <i>Comportamiento del sensor al ejercer deformaciones manuales.</i>	43
Figura 4. 6 <i>Comportamiento del sensor sin ser colocado en plantas ni aplicar deformaciones.</i>	44
Figura 4. 7 <i>Comportamiento de la resistencia del sensor colocado sobre bambú respecto al tiempo.</i>	45
Figura 4. 8 <i>Monitoreo de crecimiento del bambú con respecto al tiempo.</i>	46

Figura 4. 9 <i>Monitoreo de crecimiento de maíz.</i>	47
Figura 4. 10 <i>Comportamiento de la resistencia del sensor colocado sobre maíz respecto al tiempo.</i>	48
Figura 4. 11 <i>Biocompatibilidad de los sensores colocados sobre plantas.</i>	49
Figura 4. 12 <i>Respuesta del sensor al ser sometido a deformación.</i>	50
Figura 4. 13 <i>Interfaz gráfica y resultados.</i>	51

Índice de tablas

Tabla 2. 1. <i>Parámetros y características de los sensores</i>	13
Tabla 2. 2 <i>Aplicaciones de los nanosensores</i>	14
Tabla 4. 1 <i>Muestras de películas resistivas elaboradas a base de resina de silicio</i>	37
Tabla 4. 2 <i>Elaboración de hidrogeles a base de diferentes mezclas</i>	41

Capítulo 1 Introducción

Son diversos los factores los que influyen en la actividad agrícola. La agricultura es fundamental para el bienestar humano, es por esto por lo que diversas organizaciones están preocupadas por esta, ya que esta se ha visto afectada por el aumento de las temperaturas anuales, los patrones cambiantes de lluvias, inundaciones y la disminución de las reservas de agua (Khalid et al., 2022). La agricultura, la cría y explotación de animales, el aprovechamiento forestal, la pesca y la caza son las principales actividades económicas en el estado de Durango, aportando un 9.6% del PIB 2020 y un 3.1% en 2021 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022). El cultivo de semillas oleaginosas, leguminosas y cereales en particular, es una actividad estratégica para el desarrollo rural del estado, ya que tiene un impacto social y económico significativo. Sin embargo, dados los retos actuales relacionados con los cambios en los patrones climáticos, la falta de agua, de contaminación y degradación de suelos, la sustentabilidad de dichos cultivos y otras actividades agrícolas se ven sujetas a diferentes tipos de dificultades. La tecnificación de métodos de producción agrícolas pueden ser una alternativa para incrementar la rentabilidad y resiliencia del sector agrícola, tal y como se ha observado en otras regiones del país y del mundo. Dentro de estas alternativas de tecnificación, se han propuesto por ejemplo nuevas técnicas de riego inteligente (García et al., 2020), de liberación controlada de agroquímicos (Nongbet et al., 2022), etc., los cuales contribuyen a un mejor aprovechamiento de recursos. Sin embargo, para una implementación exitosa de estas técnicas, es necesario contar con medios novedosos de monitoreo fisiológico de cultivos, que permitan tener información detallada de la salud de las plantas, a fin de poder determinar de manera automatizada las tasas requeridas de riego y de fertilización.

1.1 Planteamiento del problema

Existe la necesidad de investigar y desarrollar sensores novedosos para el monitoreo de variables fisiológicas en plantas, que puedan tener una alta sensibilidad a distintos tipos de parámetros, pero a su vez que sean lo menos invasivos posible, además de que sean baratos, fáciles de manipular sin requerir habilidades técnicas avanzadas, y amigables con el medio ambiente. Se requiere también que estos sensores novedosos puedan ser instrumentados adecuadamente para poder hacer su calibración con precisión y así tomar una lectura de una manera estandarizada y confiable, por medio de sistemas electrónicos y computacionales para la captura y análisis de los datos que sean recopilados por el sensor, siendo importante que estos sistemas sean de fácil acceso y operación permitiendo así a los usuarios implementar y beneficiarse de estos sensores sin dificultades técnicas significativas.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Diseñar un nanosensor a base de nanotubos de carbono, aplicado al monitoreo de variables morfológicas, específicamente el crecimiento de las plantas.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Preparar dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple SWCNTs (*Single Wall Carbon Nanotubes*) para garantizar una distribución uniforme en la matriz del nanosensor.
- Elaborar películas delgadas que incorporen los SWCNTs, y diseñar el nanosensor de deformación para una detección precisa de los cambios morfológicos en las plantas.
- Diseñar e implementar una interfaz electrónica efectiva que permita la adquisición y el registro de las señales del nanosensor con alta sensibilidad y precisión.

- Desarrollar una metodología para el procesamiento de datos obtenidos por el nanosensor, que incluya técnica de análisis avanzadas para la interpretación de los datos morfológicos de las plantas.

1.3 Hipótesis

Es posible desarrollar un sistema de sensado a base de nanotubos de carbono de pared simple, aprovechando sus propiedades electrónicas y mecánicas, y utilizando técnicas de acondicionamiento, digitalización y procesamiento de señales, para el monitoreo de la tasa de crecimiento de plantas, entre otras variables fisiológicas.

1.4 Justificación

El presente proyecto permitirá tener un modelo para el desarrollo de nanosensores novedosos, a base de nanomateriales, para su aplicación en necesidades agro-industriales, en un principio para el monitoreo del crecimiento en plantas, los cuales posteriormente se podrán dopar para permitir monitorear variables fisiológicas (por ejemplo: tasa de fotosíntesis, concentración interna de CO₂, transpiración, temperatura foliar, entre otras) de plantas ya que estos se encuentran estrechamente relacionados con el crecimiento (y a su vez identificar si estas variables no están siendo afectadas por diferentes fitopatógenos que causen algún estrés biótico en las plantas o bien por las condiciones ambientales que estén causando algún estrés abiótico). Además, el diseño del nanosensor permitirá en principio una operación menos invasiva a los métodos tradicionales, disminuyendo los daños a las plantas de prueba y, por lo tanto, posibles alteraciones en sus parámetros fisiológicos debidos al mismo estrés de la prueba.

1.5 Delimitación del problema

La presente se centra a la elaboración y caracterización de un nanosensor basado en SWCNT. Los materiales utilizados para la elaboración de dicho sensor consisten principalmente en SWCNT ya que estos son con los que se cuentan actualmente en el área de investigación de la UPIDET, junto con diversos materiales comerciales que son de fácil adquisición lo que contribuye a la reducción de los costos de producción del sensor.

Además, se emplea un microcontrolador Arduino[®] para la adquisición de los datos provenientes del sensor, la programación correspondiente se realiza en Python[®], utilizando las librerías necesarias para la conexión con el microcontrolador.

Las simulaciones del circuito para la operación de el sensor se realizan mediante el software KiCad[®], un paquete de uso libre para la automatización del diseño electrónico.

1.7 Estado del arte

1.7.1 Aplicaciones de los nanomateriales

Entre las aplicaciones de la NT podemos encontrar el uso de nanosensores y los usos en sistemas de suministro inteligentes hechos de nano-productos, los cuales poseen el potencial de revolucionar el sistema alimentario. Algunos de ellos ya se emplean en el sector agrícola, orientados a desarrollar nuevos sistemas productivos y de seguridad alimentaria (p.ej., control de patógenos en cultivos, detección y tratamiento de enfermedades, y herramientas para biología molecular y celular), los cuales ayudan a minimizar posibles pérdidas, y aumentan la productividad de los cultivos al mejorar el uso hídrico y los nutrientes (Godínez-García et al., 2023)

De hecho, existen áreas de oportunidad en donde nanosensores con alta sensibilidad y flexibilidad podrían tener un impacto considerable. Por ejemplo, estudios hechos en pinos muestran que las características morfológicas como altura, diámetro basal, relación altura/diámetro basal, altura/longitud de raíz, biomasa seca raíz/ biomasa seca aérea, e índice de calidad de Dickso (porcentaje de peso seco con relación al contenido de agua en las plantas), responden de una diferente manera a las concentraciones de los nutrimentos, lo cual sugiere la utilidad del monitoreo en el balance de los nutrientes (macronutrientes y micronutrientes) en el suelo (J. Trinidad Sáenz Reyes et al., 2014). Por otra parte, cultivos expuestos a diferentes condiciones de estrés como sequías, cambios extremos en la temperatura, deficiencias nutricionales entre otras, presentan un comportamiento anormal, detectable por medio de variables fisiológicas como conductividad estomática, respiración y temperatura foliar (Rodríguez-Yzquierdo et al., 2021). El monitoreo adecuado de estas variables podría proveer información temprana para el cuidado oportuno de los cultivos.

Los biosensores electroquímicos que utilizan nanomateriales como los nanotubos de carbono (CNTs) para mejorar la sensibilidad y el tiempo de respuesta son candidatos potenciales para la detección de proteínas (Janssen et al., 2019). Se ha informado que los biosensores detectan compuestos como fenoles/fenoxiácidos (por ejemplo, fenol y catecol), compuestos poliaromáticos (por ejemplo, benzo, pireno) plaguicidas halogenados (por ejemplo, triazinas), compuestos orgánicos volátiles, (por ejemplo, benceno) y sustancias inorgánicas como el mercurio (Baruah & Dutta, 2009) .

En experimentos recientes se ha desarrollado un sensor flexible conductivo y altamente sensible a la presión basado en grafeno, el cual exhibió una buena estabilidad mecánica y sus pruebas se llevaron a cabo al monitorear de manera eficaz los latidos del corazón, actividades en las articulaciones y el flujo de aire (Yang et al., 2018).

Por otra parte, se ha diseñado un sensor basado en nanotubos de carbono de pared múltiple MWCNTs y polidimetilsiloxano, el cual es autorreparable y posee una alta sensibilidad y rango de medición. Dicho sensor elaborado exhibió una eficiencia de curación eléctrica (EFE) del 97.8%, además tiene altos valores de factor de calibre (GF), así como un amplio rango de medición (0-136.32%), este sensor autorreparable tiene aplicaciones prometedoras en diversas áreas (Yu et al., 2023).

Otras innovaciones en estas áreas son el desarrollo de un método de dispersión de CNT, pirena y ácido cloro sulfónico, obteniendo así una excelente dispersión, que se atribuye a los enlaces no covalentes entre los CNT y el pireno y la interacción entre los grupos de amina y sulfonato. Con esto se ha elaborado un sensor que muestra una excelente selectividad y sensibilidad que puede responder a concentraciones de CO₂ en un rango de 300 a 5000 ppm (Liu et al., 2023).

También se han diseñado sensores a base de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT's) y negro de humo (*carbon black*), donde utilizan alcohol como disolvente de las cargas conductoras de carbono. Utilizan PDMS (Polidimetilsiloxano) como material matriz y se le añade azúcar granulada para integrarse a esta matriz. En este experimento se muestra que la estructura que es creada por la disolución del azúcar puede cambiar el módulo elástico del material y aumentar la longitud de tracción de la matriz mejorando así el rendimiento de tracción del sensor. Los resultados que son obtenidos de este experimento muestran que la resistencia inicial respecto a la resistencia final cambia con los cambios periódicos en la fuerza de tensión y el sensor tiene una buena regularidad y estabilidad, además de que se muestra que el cambio en la resistencia suele ser estable después de un pico de rebasamiento, lo cual indica que el sensor se puede recuperar rápidamente y es capaz de funcionar de manera confiable después del rebasamiento (P. Zhang et al., 2020).

Otro ejemplo de la aplicación de nanomateriales en áreas agrícolas es la detección de niveles de potasio en el suelo, utilizando MWCNTs modificados con óxido de zinc y valinomicina. Los dispositivos hechos a base de esta funcionalización fueron usados para mediciones estables y altamente sensibles ante la presencia de potasio en el suelo (Kumar et al., 2021) .

Y finalmente se ha demostrado que la administración de MWCNTs en bajas concentraciones produce efectos fisiológicos favorables en el desarrollo en la etapa de multiplicación *in vitro* de la caña de azúcar usando biorreactores de inmersión temporal. Los resultados demostraron que los MWCNTs pueden inducir un efecto hormético durante la multiplicación *in vitro* de la caña de azúcar y pueden tener un uso potencial en otras especies. Además, los MWCNTs brindan aplicaciones para mejorar la producción de cultivos aumentando la eficiencia durante la micropropagación (Sorcia-Morales et al., 2021).

Capítulo 2 Marco Teórico

En esta sección se presentarán algunos conceptos básicos, así como algunas características que deben de presentar los sensores, las propiedades de los nanotubos de carbono, como se han utilizado algunos materiales elastómeros como el PVA (Alcohol Polivinílico) y el PDMS para la elaboración de sensores y porque son de vital importancia en el desarrollo, elaboración e implementación de los sensores a desarrollar en este presente proyecto.

2.1 Nanotecnología y nanomateriales

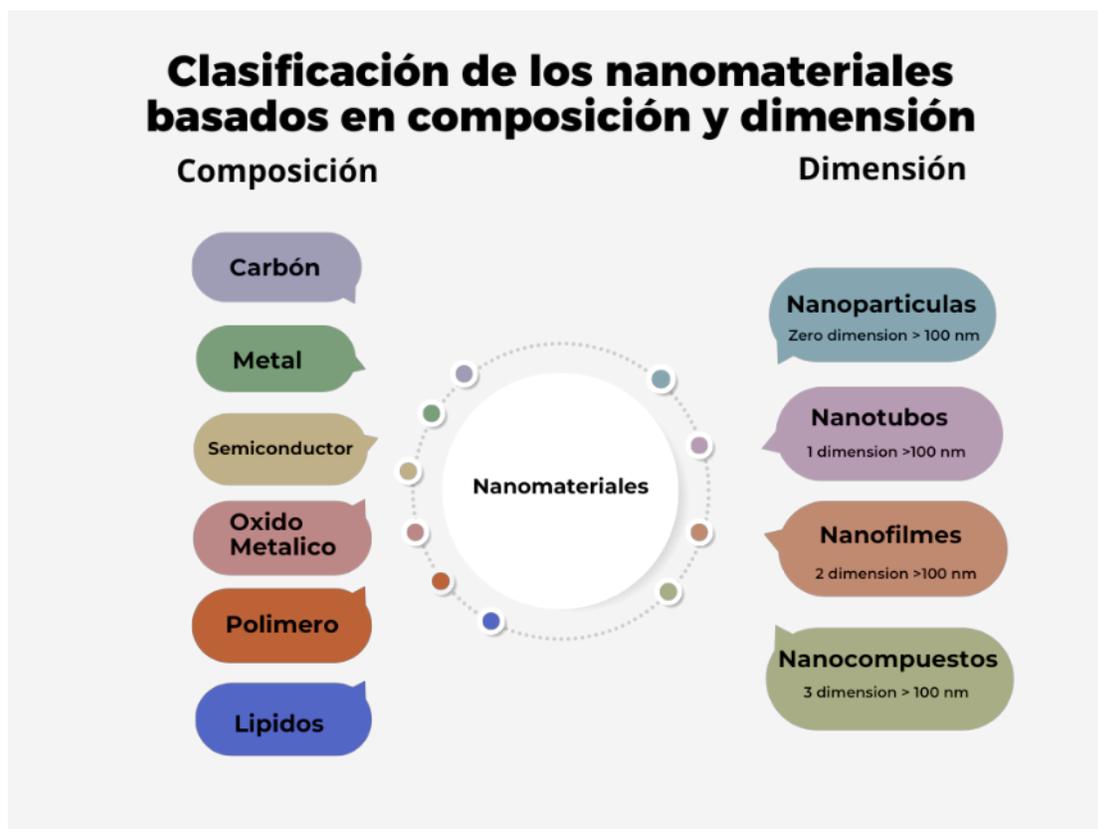
Durante los últimos años, la nanotecnología agrícola se ha centrado en la investigación y desarrollo orientado a resolver problemas agrícolas y ambientales (Godínez-García et al., 2023). La nanotecnología (NT) se especializa en el estudio y la creación de materiales funcionales, ya sea en dispositivos y sistemas a través de la manipulación de la materia a dimensiones de escala nanométrica (esto es con una o más dimensiones del orden de 1 y 100 nanómetros, en donde 1 nanómetro equivale a 0.000000001 metros). Ejemplos recientes de aplicaciones nanotecnológicas a la agroindustria de hecho abordan temas sobre la disminución del hambre, la subalimentación y la tasa de mortalidad en los niños, ya que se ha aumentado la calidad, el rendimiento de los cultivos, así como la reducción de la contaminación causada por productos químicos, incremento de la sostenibilidad, la mejora de los cultivos y productividad, comúnmente con la generación de fertilizantes, herbicidas, pesticidas, fungicidas y nanosensores (Neme et al., 2021).

Los nanomateriales son materiales con estructuras y propiedades en una escala nanométrica. Un nanomaterial manufacturado es un material que se genera intencionalmente de tal manera que está compuesto por partes estructurales y funcionales discretas, ya sea en la superficie o internamente, estos materiales pueden tener diferentes composiciones y dimensiones ver figura 2.1. El gran

potencial de los materiales nanoestructurados radica en las propiedades fisicoquímicas y biológicas que muestran a dicha escala, con características muy diferentes a las que podemos encontrar con sus equivalentes convencionales (SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks), 2007). Las propiedades mejoradas a nanoescala, como la dureza, conductividad eléctrica, características magnéticas, reactividad química y la toxicidad, se derivan de una serie de parámetros como la forma, la superficie química, el tamaño y el área de superficie específica. Esto ha provocado en los últimos años, un gran interés por desarrollar tecnología aplicada (y emprendimientos asociados) para la solución de una gran variedad de problemas (Ji et al., 2021a; Nanomateriales S.A. de C.V., 2015).

Figura 2. 1:

Clasificación de los nanomateriales basados en su composición y dimensión.



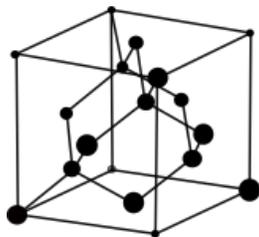
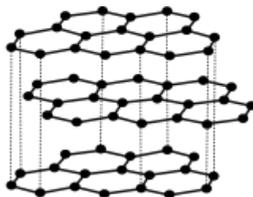
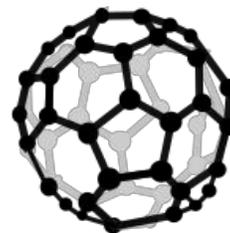
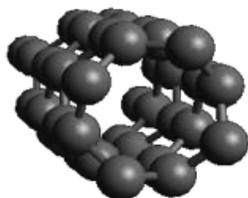
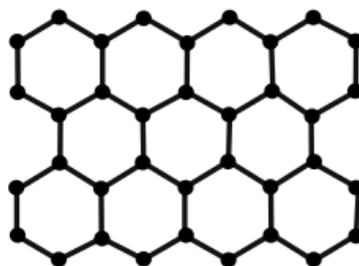
Fuente: Adaptado de referencia (Ji et al., 2021b)

En el caso particular de los nanomateriales debido a su pequeño tamaño, las nanopartículas muestran una alta relación superficie-volumen, lo que permite una detección altamente sensible incluso a escalas femto (1×10^{-15}), atto (1×10^{-18}) y zepto (1×10^{-21}). Además, las nanopartículas son controlables en su tamaño y pueden exhibir una alta reactividad y conductividad eléctrica (Arndt et al., 2020) las nanopartículas actúan como generadoras o detectoras de una señal, mejorando la sensibilidad de técnicas convencionales (Swierczewska et al., 2012).

Los nanomateriales pueden ser de diferentes tipos, como nanopartículas, nanotubos, nanocables, nanocristales y nanocompuestos, los cuales tienen propiedades únicas en las que se destacan una alta conductividad eléctrica, alta resistencia mecánica, alta superficie específica, alta reactividad química y propiedades ópticas especiales. El carbono es uno de los elementos más comunes que existen en la naturaleza, es el elemento pilar de la química orgánica y tiene diversas aplicaciones en ciencia y tecnología, este elemento se presenta en una variedad de formas, es un material poco abundante en forma libre y se encuentra comúnmente en dos estados alotrópicos: diamante y grafito. De este último pueden sintetizarse otras formas, donde los nanomateriales a base de carbono (bien conocidos para la mejora de tolerancia al estrés en las plantas y por lo tanto la producción agrícola). La figura 2.2 muestra ejemplos de esta familia de materiales, entre los que se encuentran los puntos de carbono (CD), nanotubos de carbono (CNT), fullerenos, grafeno (GRA), óxido de grafeno (GO), nanocuernos (CNH) y nanofibras de carbono (CNF) (Serag et al., 2011; Zhu et al., 2022).

Figura 2. 2:

Formas en las que se puede encontrar el carbono.

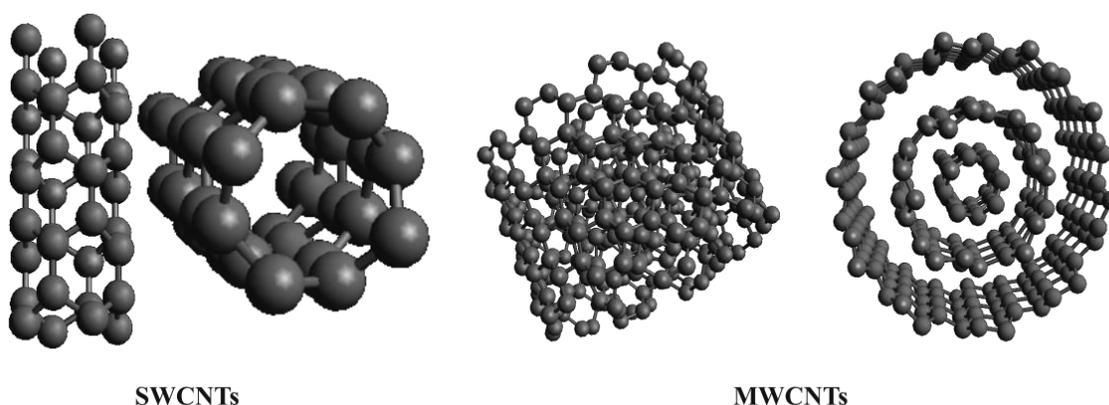
**Diamante****Grafito****Fullereno****Nanotubos de carbono****Grafeno**

Los CNTs son una estructura casi unidimensional que, debido a su alta relación entre longitud y diámetro, exhiben una combinación única de propiedades electrónicas, térmicas, elásticas, ópticas, mecánicas y químicas, que prometen una amplia gama de aplicaciones potenciales en sectores industriales clave (Hussain Chaudhery Mustansar, 2018). Estructuralmente, los CNTs pueden considerarse como una lámina enrollada de grafeno, los cuales se pueden agrupar en dos tipos principales como se muestra en la figura 2.3, conocidos principalmente por sus siglas en inglés como SWCNTs (Single Wall Carbon Nanotubes / Nanotubos de Carbono de Pared Simple) y MWCNTs (Multiple Wall Carbon Nanotubes/ Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiples), con dimensiones de entre 0.5-1.5 nm y 7-100 nm respectivamente (Ferrier & Honeychurch, 2021). Algunas de sus aplicaciones son en celdas solares, materiales estructurales, electrónicos y semiconductores. Las capas de carbono pueden ser mojadas por otros materiales sin afectar la

estabilidad de los nanotubos. Las propiedades conductoras y antimicrobianas de los CNTs pueden ser utilizadas para la captura e inactivación de virus y patógenos. Para mejorar esta propiedad antimicrobiana se pueden utilizar las nanopartículas conocidas como antivirales (por ejemplo, Ag, Cu, ZnO, etc.) que se pueden integrar en el proceso de síntesis de CNT (Chitranshi et al., 2020).

Figura 2. 3:

Modelos moleculares de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs) y de pared múltiple (MWCNTs).



2.2 Nanosensores

Mucha investigación en el área de los nanomateriales está orientada en el desarrollo de nuevos sensores, por ejemplo, para la detección de patógenos hasta fracciones muy diminutas mediante la explotación de nuevas propiedades de materiales nanoestructurados (Baruah & Dutta, 2009).

Un nanosensor tiene la capacidad de medir hasta el nivel de moléculas individuales y se compone de elementos clave, incluyendo un sensor, un analito, un transductor y un detector. En su funcionamiento habitual, los nanosensores registran cambios eléctricos en los materiales del sensor. Cuando el analito se difunde desde la solución a la superficie del sensor, reacciona de manera específica y eficiente, generando así una modificación en las propiedades fisicoquímicas del

transductor. Este cambio, a su vez, altera las propiedades ópticas o electrónicas de la superficie del transductor, induciendo una señal eléctrica que puede ser detectada (Khazaei et al., 2023).

En la tabla 2.1 se muestran algunos parámetros y características de los sensores

Tabla 2. 1.

Parámetros y características de los sensores

Parámetros y características de los sensores	
Sensibilidad	Cambio en el valor de salida por unidad de cambio en la variable de entrada.
Selectividad	Capacidad de discriminación del sensor con respecto a los analitos interferentes, que son fuente de ruido en la salida.
Resolución	Cambio más pequeño medible en el valor del analito que puede ser detectado por el dispositivo.
Tiempo de respuesta	El tiempo que tarda el sensor en alcanzar el 63% del valor final de la variable detectada.
Característica de calibración	La curva obtenida al trazar la salida del sensor a lo largo de la abscisa y los valores del analito a lo largo de la ordenada.
Linealidad	Grado en que la curva de calibración del sensor coincide con una línea recta especificada que se aproxima a la misma.
Repetibilidad	Las variaciones que se pueden obtener al realizar mediciones bajo las mismas circunstancias.
Estabilidad	El grado en que la curva de calibración del sensor permanece sin cambios durante un periodo de tiempo para que no sea necesario recalibrar el sensor.
Deriva	Desplazamiento o traslación en la curva de calibración del sensor, con respecto al tiempo.
Parámetros ambientales permitidos	Valores máximos permitidos como lo son temperatura, presión, humedad relativa, luz o iluminación, etc., bajo los cuales el dispositivo puede operar satisfactoriamente

Dentro de las ventajas de los nanosensores podemos encontrar es que estos cuentan con una alta sensibilidad, son de tamaño pequeño, cuentan con un bajo tiempo de respuesta, son de bajo costo y pueden ser multifuncionales (Kumar Khanna, 2021).

En la tabla 2.2 podemos ver algunas de las aplicaciones de los nanosensores en diversas areas.

Tabla 2. 2

Aplicaciones de los nanosensores

Aplicación	Referencia
Control del estado de trafico	(El Barachi et al., 2020)
Detección de Ph y temperatura en medios líquidos	(Sarmanova et al., 2021)
Detección de metales pesados en el suelo	(Potadar et al., 2022)
Monitoreo de la calidad del agua	(Gupte & Pradeep, 2022)
Detección de iones de cobre en aguas naturales	(Namikuchi et al., 2023)
Detección de adulterantes en leche	(Himshweta & Singh, 2023)
Embalaje, calidad y seguridad en alimentos	(Sharma et al., 2023)
Diagnóstico y terapia de trastornos neurodegenerativos y enfermedad inflamatoria intestinal	(Palaniyandi et al., 2023)
Detección temprana de enfermedades como el cáncer	(Khazaei et al., 2023)
Protección de cultivos	(Kamari et al., 2023)

Frente a los desafíos del desarrollo agrícola actual, los nanosensores han logrado un monitoreo preciso, en tiempo real y de alta resolución espaciotemporal de plantas individuales a microescala, y traducen estas moléculas de señalización generadas por la planta a través de señales ópticas, inalámbricas o eléctricas, ayudando así a las personas a controlar mejor todos los aspectos de la producción agrícola (Q. Zhang et al., 2022).

2.3 Elastómeros utilizados en la creación de nanosensores

2.3.1 Alcohol Polivinílico

Los hidrogeles de polímeros conductores poseen una ventaja similar a la de los tejidos, al mismo tiempo que exhiben conductividad eléctrica, lo que los hace materiales adecuados para la elaboración de dispositivos bioelectrónicos emergentes. Los hidrogeles son materiales que se componen de una red tridimensional de polímero reticulados y agua. En la elaboración de hidrogeles se han utilizado variedades de polímeros naturales solubles en agua ya que tienen la capacidad de para retener grandes cantidades de agua.

El PVA es un polímero sintético soluble en agua conocido por su resistencia a los solventes orgánicos. Es un polímero parcialmente cristalino (Abdullah et al., 2021). Los hidrogeles a base de PVA tienen una excelente resistencia mecánica, buena biodegradabilidad, resistencia química, baja toxicidad inherente, biocompatibilidad, estabilidad fisicoquímica, alta hidrofiliidad, estabilidad fisicoquímica (Kalidas & Sumathi, 2023) y además se pueden preparar fácilmente en hidrogeles conductores iónicos, es por esto por lo que, debido a la excelente eficiencia del transporte de iones, los hidrogeles conductores se han convertido en candidatos ideales para sensores de deformación.

En comparación con los hidrogeles reticulados químicamente clásicos, las interacciones dinámicas no covalentes (resultado de las fuerzas de atracción entre las moléculas de carga opuesta) dotan a los hidrogeles de muchas propiedades interesantes, como una excelente resistencia, alta capacidad de estiramiento, resistencia a la fatiga y autocuración, por lo cual además de no ser tóxicos estos materiales se han hecho adecuados para aplicaciones de tejidos artificiales y lentes de contacto en el caso de aplicaciones biomédicas; siendo los factores externos que causan un cambio en el

volumen del hidrogel el pH, temperatura, tipo de sal, campos eléctricos o magnéticos, radiaciones como lo son la electromagnética o la ultrasónica. En estudios recientes la conductividad y la tenacidad de los hidrogeles se han incrementado mediante la adición de nanopartículas (R. Zhang et al., 2022).

Existen, algunos desafíos que dificultan el desarrollo de las películas de hidrogel. Primeramente, la reticulación en la interfaz del hidrogel suele ser pobre, los defectos resultantes a escala micrométrica en la superficie hacen que las propiedades mecánicas de la película de hidrogel se deterioren bruscamente a medida que disminuye el grosor del hidrogel. Por otro lado, el hidrogel inevitablemente se deshidratará gradualmente en el aire ambiente y se congelará a bajas temperaturas, lo que provocará el deterioro en la forma del material y otras propiedades, lo que se vuelve más grave una vez que el grosor del hidrogel va disminuyendo debido a la gran área de contacto con el entorno circundante. Incluso en aplicación de detección de humedad, la deshidratación del hidrogel es inevitable, limitando el rango de detección (Wu et al., 2022).

Para mejorar simultáneamente las propiedades mecánicas y la conductividad eléctrica de los hidrogeles, se ha empleado un método simple bajo la acción sinérgica combinando congelación y salazón para preparar hidrogeles de PVA. Este hidrogel se preparó desgasificando ultrasónicamente una solución acuosa de PVA en un molde, congelándola y luego empapándola en una solución acuosa de NaCl durante la noche. Todo el proceso de preparación es simple y adecuado para la producción masiva. Mientras tanto, la introducción de una pequeña cantidad de GO (0,15 % en peso) puede formar una estructura de red PVA / GO más compleja a través del enlace de hidrógeno con la cadena de PVA. Por lo tanto, el hidrogel PVA / GO que contiene solo 5 % en peso de PVA exhibe excelentes propiedades mecánicas (tensión de tracción de hasta 65 kPa) y conductividad iónica (hasta 3.38 S m^{-1}). Por lo tanto, una encapsulación de dicho hidrogel

conductor de iones en cintas aislantes estirables puede conducir al desarrollo exitoso de un sensor de deformación PVA / GO (Wei et al., 2022).

2.3.2 Polidimetilsiloxano

El PDMS es un polímero elastomérico con propiedades interesantes en las que se incluyen buena resistencia a la biodegradación, biocompatibilidad, estabilidad química, flexibilidad mecánica y fabricación sencilla (Miranda et al., 2021). Está dentro del grupo de polisiloxanos, también conocidos como siliconas. Es un material transparente que se distingue por su alta estabilidad térmica y oxidativa, alta permeabilidad a gases, hidrofobicidad y excelente dieléctricidad. Es ópticamente transparente y, en general, inerte, no tóxico y no flamable, además tiene un comportamiento hiperelástico, lo cual permite al material someterse a largas deformaciones antes de su ruptura (Cardoso et al., 2018). Este ha sido usado en una amplia variedad de industrias como la electrónica, mecánica y la ingeniería biomédica. En otros ámbitos se ha utilizado con nanotubos de carbono (CNT-PDMS) para la creación de sensores flexibles (Song et al., 2022).

La temperatura, el tiempo y la proporción del agente de curado utilizado son solo algunos de los factores que pueden afectar significativamente las propiedades mecánicas de un material, como el que se utiliza en el proceso de manufactura del PDMS. El término "temperatura de curado" se refiere al grado de calor al que se somete un material para comenzar a madurar, polimerizar o solidificar. El tiempo de curado, por otro lado, es el tiempo que toma que el polímero se solidifique después de su aplicación y moldeo. Este factor influye directamente en las propiedades mecánicas de los elastómeros, lo que determina su resistencia y durabilidad.

El catalizador, también conocido como agente de curado, es esencial en el proceso de transformación del PDMS de un estado líquido a un estado sólido de elastómero, permitiendo que

el material adquiera la forma y propiedades deseadas. Este agente químico acelera o inicia la reacción de polimerización.

Conclusiones

En la elaboración de nanosensores, se busca aprovechar las propiedades de los CNTs, abriendo nuevos caminos para la aplicación de estos materiales, especialmente en el campo de los polímeros conductores y los compuestos basados en CNTs. Al desarrollar un sensor usando SWCNTs, por medio de una mezcla donde se utilicen las propiedades de los polímeros antes mencionados, se buscaría detectar, de forma inicial el crecimiento en las plantas con el cambio que se produzca en la resistencia del nanosensor elaborado, para que en posteriores avances en los nanosensores al realizar un dopaje de los nanotubos de carbono ayuden a detectar diferentes factores que afectan directa o indirectamente el crecimiento y/o desarrollo de las plantas, como pudiera ser la fotosíntesis (la cual es importante porque esta tiene una estrecha relación con el número de frutos así como el tamaño de estos) ya que esta se ve afectada por la concentración interna y externa de gases como son la concentración de CO_2 y la de O_2 , un déficit hídrico, estrés térmico y la composición e intensidad de la luz (Aspiazú et al., 2010). Por otro lado, tenemos la temperatura de la superficie foliar de la planta, la cual indica la conductancia estomática de la planta que es la propiedad de las estomas que permiten el flujo de vapor de agua a través de la planta (Pino V. et al., 2019).

Capítulo 3 Materiales y Métodos

En el presente capítulo se abordan las diferentes rutas que se siguieron para la elaboración de los sensores realizados a base de SWCNTs, en donde se detalla el proceso de elaboración de cada una de las muestras y las diferencias que se obtuvieron de estas.

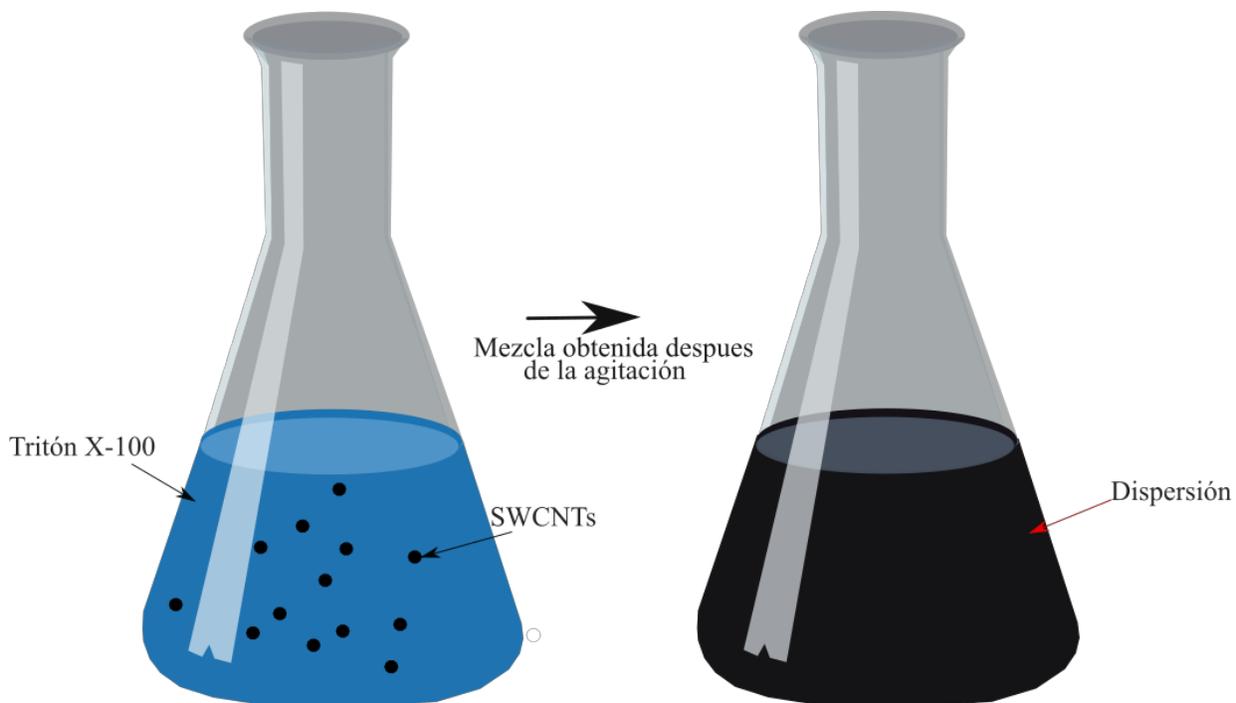
En el caso de la dispersión no covalente, se han utilizado dodecilsulfato de sodio (SDS), Dodecil Bencen Sulfonato de Sodio (DBSS) y Triton X esto debido a su disponibilidad y bajo costo. Los polímeros rodeados de forma no covalente permanecen incluso después del proceso de lavado, como la filtración, para proporcionar "CNT envueltos en polímero". En algunas aplicaciones, dichos dispersantes envueltos actúan como un contaminante, pero en algunos casos, los CNT envueltos mejoran sinérgicamente el rendimiento de los CNT si los polímeros se diseñan y colocan estratégicamente (Norizan et al., 2020).

3.1 Preparación de dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs)

La funcionalización no covalente utilizada se basó en surfactantes como lo fueron DBSS y Tritón X-100. Estos tipos de moléculas dan como resultado la dispersión de los nanotubos de carbono a través de la adsorción física (Kharlamova et al., 2022). Para la elaboración de sensores resistivos a base de nanotubos de carbono se realizaron diferentes dispersiones ver figura 3.1 las cuales constan de 15 ml de Tritón X-100 (solución surfactante al 1% en agua, (-Hycel reactivos químicos) a los cuales se les añadió 10 mg de nanotubos de carbono (pureza 99.8%, Sigma Aldrich®) los cuales fueron puestos en un homogeneizador FSH-2A por un tiempo de 4, 6 y 10 horas, hasta lograr una mezcla homogénea de un color oscuro con una concentración del 0.66%. Este tipo de dispersión es considerada como un método no destructivo y permite conservar las propiedades de los materiales basados en carbono.

Figura 3. 1

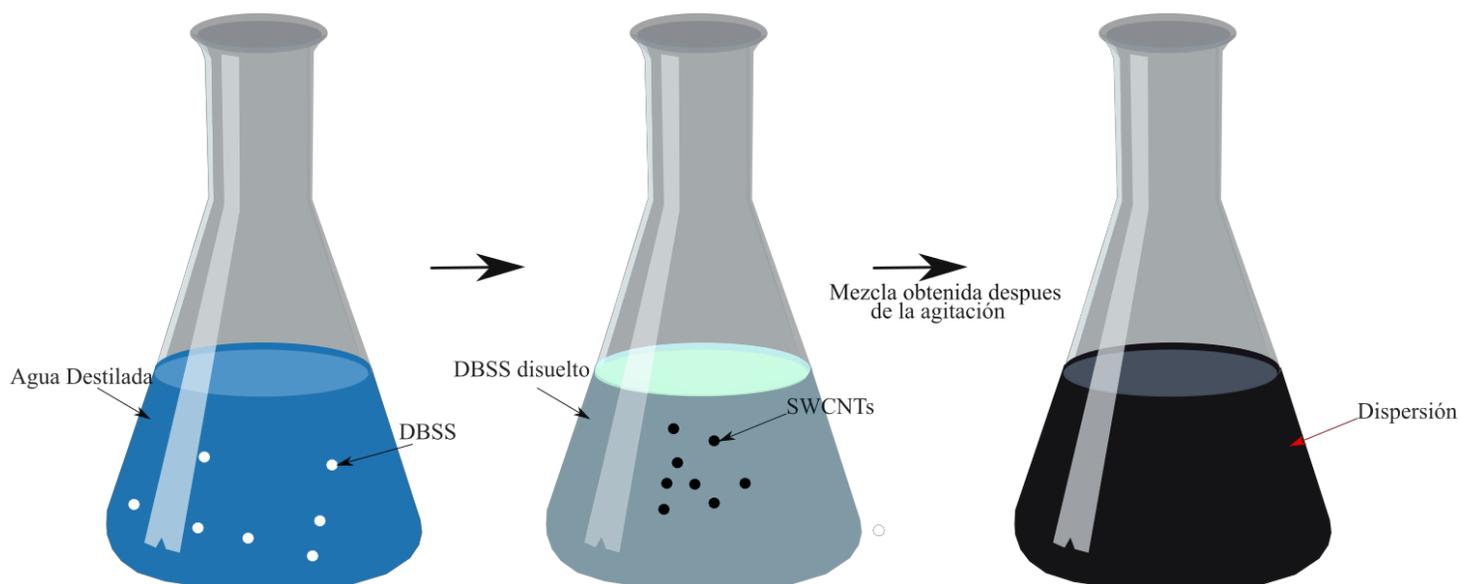
Esquemático de la preparación de dispersión de SWCNTs.



En la elaboración de otra de las dispersiones ver figura 3.2 se colocaron 15 ml de agua destilada (CTR-SCIENTIFIC®), 2 mg de DBSS (AZUMEX®) en un homogeneizador FSH-2A por un tiempo de 1 hora teniendo una concentración del 0.13%, posterior a esto se le añadieron 10 mg de nanotubos de carbono (pureza 99.8%, Sigma Aldrich®) y se dejó por 3 horas más en el homogeneizador hasta lograr una mezcla homogénea con una concentración de 0.66%.

Figura 3. 2

Esquemático de la preparación de la preparación de la dispersión de SWCNTs en DBSS.

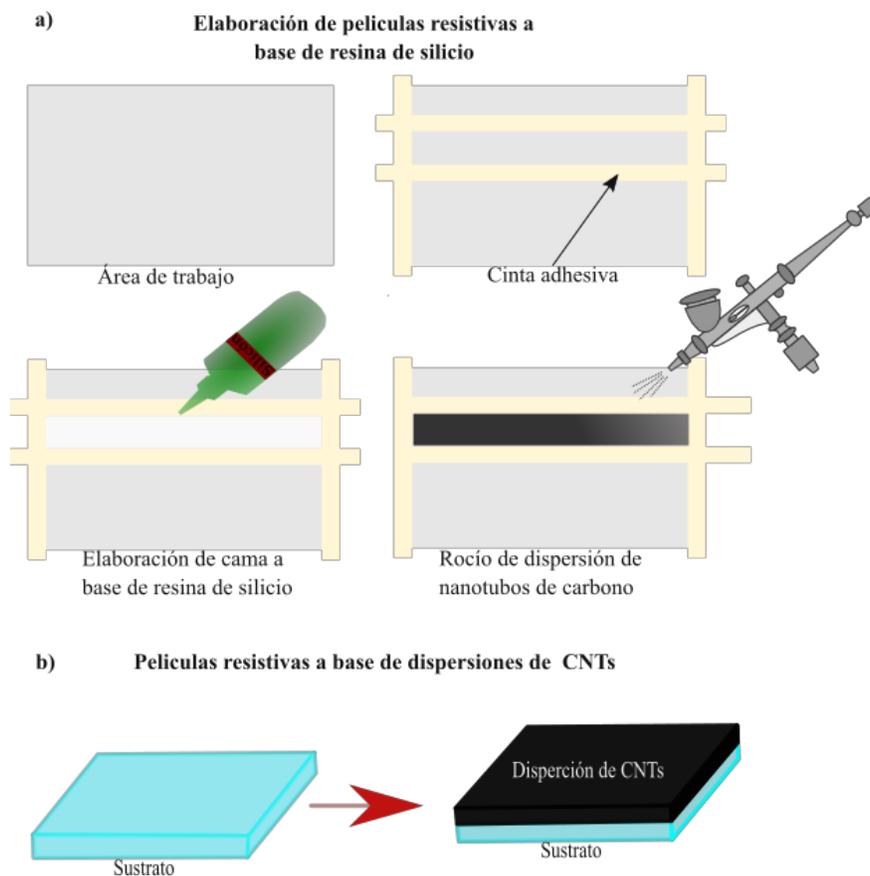


3.2 Elaboración de películas resistivas a base SWCNTs

En el proceso de fabricación de películas delgadas tal como se ilustra en la Figura 3.3a, se emplearon dispersiones de nanotubos de carbono basadas en Tritón X-100. Estas películas se prepararon sobre una superficie de 22 cm de largo por 2 cm de ancho, con un grosor determinado utilizando cinta adhesiva como referencia, teniendo un grosor de aproximadamente de 30 milésimas de pulgada N(0.030 pulgadas) lo que equivaldría a 0.07622 cm de grosor. Para la aplicación de la dispersión de nanotubos de carbono, se rociaron 5 ml de la dispersión con una concentración del 0.66%, a una altura de 20 cm, con el propósito de evitar el secado y agrietamiento de las películas de silicón. El tiempo de rociado de la dispersión fue de 10 minutos, lo que resultó en la formación de unas películas como se muestra en la Figura 3.4

Figura 3. 3

Esquemáticos de elaboración de películas de resina de silicio y CNTs.



Nota: a) Elaboración de películas resistentes de resina de silicio, b) películas resistentes a base dispersiones de CNTs.

Figura 3. 4

Películas resistentes a base de nanotubos de carbono de pared simple.

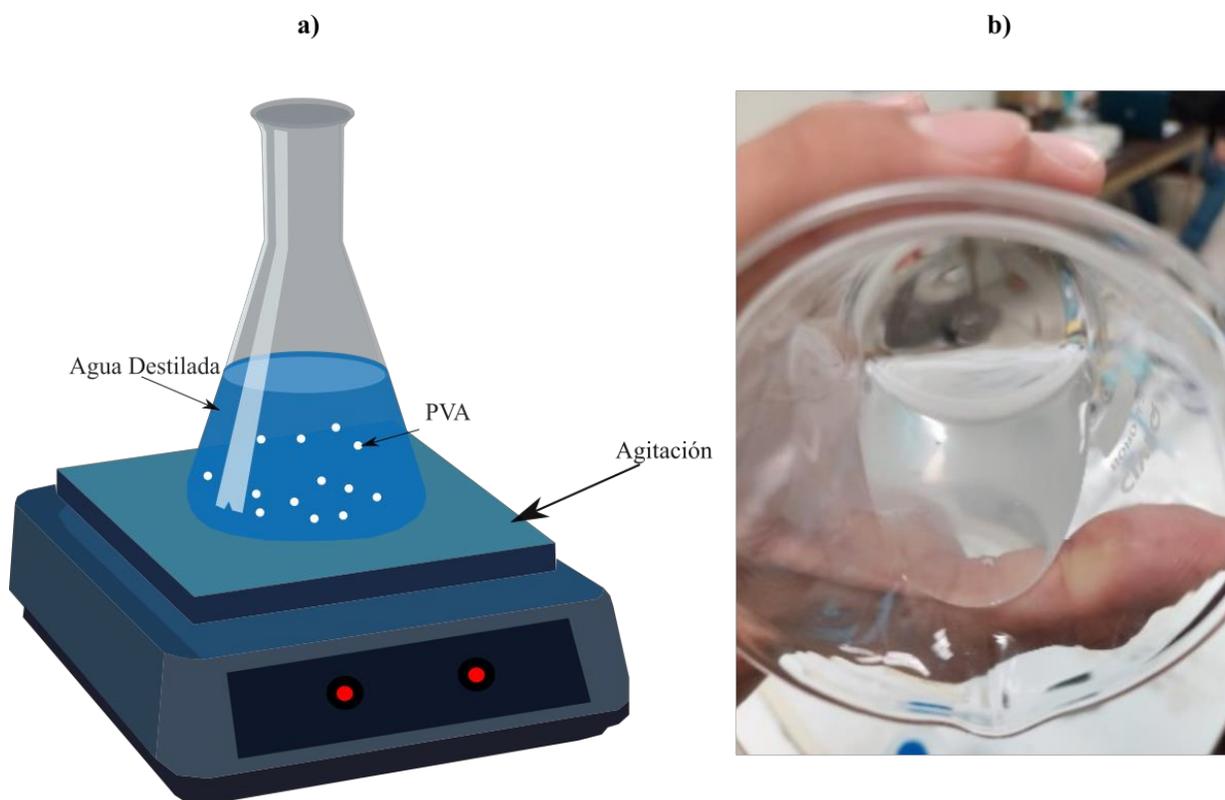


3.3 Elaboración de hidrogel resistivo a base de SWCNTs

Durante la preparación de las dispersiones de nanotubos de carbono, se elaboró un hidrogel. Este procedimiento se llevó a cabo en una placa agitadora (S18524, Thermolyne), utilizando 200 ml de agua destilada (CTR-SCIENTIFIC®) donde se añadieron gradualmente 8 gr de PVA (REAXSOL®) al agua destilada ver figura 3.5. Se observó que la adición precipitada de PVA en el agua destilada podría ocasionar aglomeraciones y, por lo tanto, retrasar la formación del hidrogel. La mezcla se dejó reposar en la placa durante 1 hora, tras lo cual se permitió que el hidrogel se asentara durante 12 horas para lograr una consistencia óptima, logrando así una concentración del 4%.

Figura 3. 5

Elaboración de hidrogel.



Nota: a) Esquemático sobre elaboración de hidrogel, b) Hidrogel obtenido

Además, se preparó un bórax líquido con una concentración del 0.025%, utilizando 200 ml de agua destilada. Para ello, el agua se calentó a fuego lento, y se agregaron 5 mg de bórax en polvo, que se mezclaron durante aproximadamente 5 minutos antes de que el agua alcanzara su punto de ebullición.

En el proceso de elaboración del hidrogel a base de nanotubos de carbono, se agregaron 10 ml del hidrogel a base de PVA en la placa agitadora, seguido de la adición de 5 ml de la dispersión de nanotubos de carbono (ya sea la elaborada con Tritón X-100 o con agua destilada y DBSS). Posteriormente, se incorporaron 2 mg de grafito en polvo, y la mezcla se agitó durante 10 minutos para garantizar una distribución uniforme. Luego, la mezcla se retiró de la placa y se añadió 1 ml de bórax utilizando una jeringa, seguido de una agitación con un tubo agitador de vidrio hasta obtener una consistencia similar a la de una masa blanda, tal como se muestra en la Figura 3.6. Finalmente, la mezcla se almacenó en bolsas pequeñas de hule resellables para preservar el hidrogel resistivo.

Figura 3. 6

Elaboración de Hidrogel a base de nanotubos de carbono de pared simple.

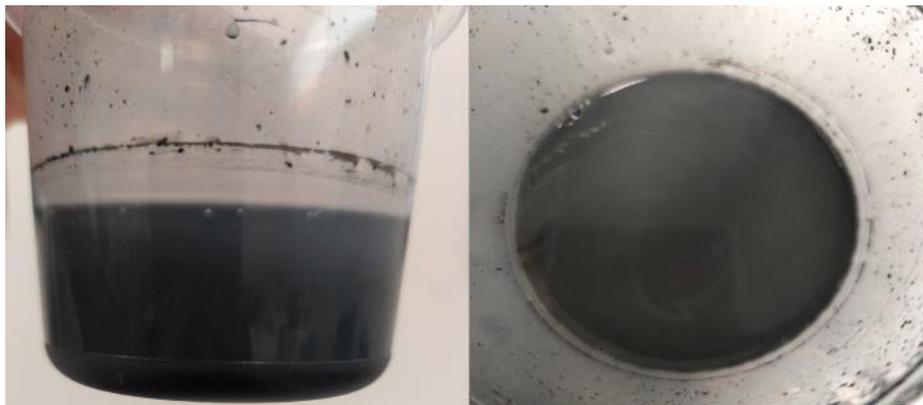


3.4 Elaboración de composito para creación de sensores a base de SWCNTs

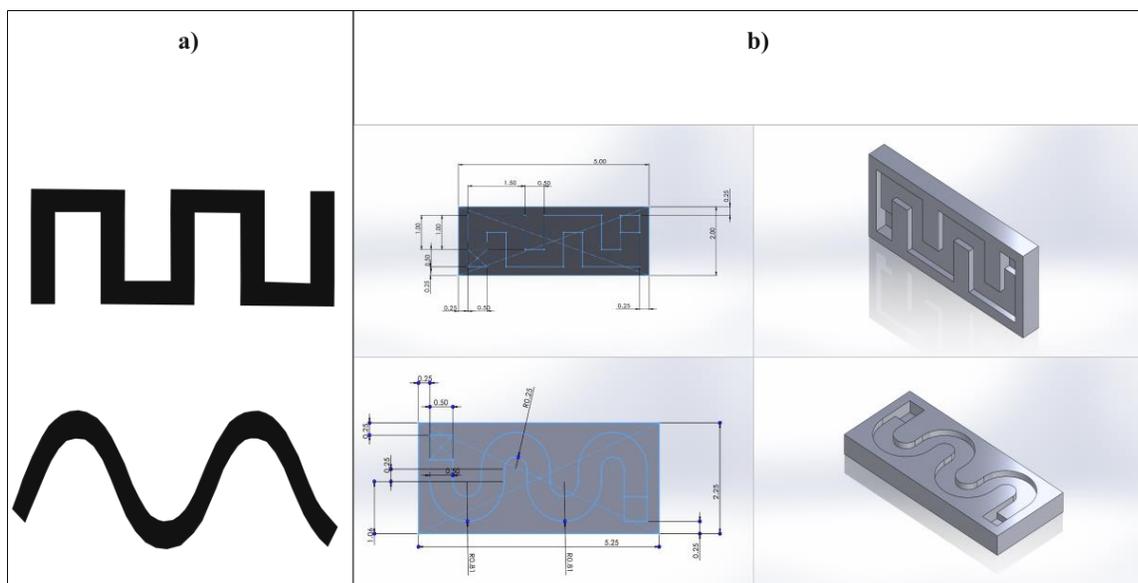
Durante la preparación de la dispersión de SWCNTs, se utilizó un agitador magnético, para mezclar 50 ml de agua destilada, a la que se añadieron 947.2 mg de PVA. Después de lograr su completa disolución, se incorporaron 20 ml de acetato de polivinilo (PVAc), un adhesivo comercial de PVA, y se dejó la mezcla en agitación durante 1 hora. Posteriormente, se agregaron 183.4 mg de grafito en polvo y 10 ml de la dispersión de nanotubos de carbono al 0.66%.

Figura 3. 7

Composito elaborado a base de las dispersiones de SWCNTs.



Para la evaluación del composito se utilizaron los moldes mostrados en la figura 3.8 en los cuales se colocó una pequeña cantidad de PVAc como base, sobre la cual se depositó por medio de una jeringa una cantidad determinada de composito (ver Figura 3.7), que se extendió naturalmente en forma de película delgada. Una vez colocada la primera capa del sensor, se insertaron los cables que sirvieron como electrodos para la conexión del sensor al circuito. Durante este proceso, fue necesario esperar a que se secase la mezcla previamente colocada antes de agregar una nueva capa del composito. En total, se requirieron 10 capas para completar la fabricación del sensor. Una vez seca la última capa de la mezcla, se añadió otra pequeña cantidad de PVAc para proteger al sensor.

Figura 3. 8*Moldes para prototipos.*

Nota: a) propuesta de diseño para forma del sensor, b) prototipos diseñados en base a la propuesta para la forma del sensor la profundidad del molde es de 1.5 mm, en los extremos la profundidad es de 3 mm para la colocación de los electrodos, el ancho del sensor es de 4.5 mm, el largo y ancho de la placa es de 2x5 cm.

3.5 Diseño y elaboración de la interfaz electrónica para adquisición de señal del nanosensor

En el proceso de desarrollo de la interfaz electrónica, se inició midiendo la conductividad de las películas de resina de silicio, como se muestra en la Figura 3.9a. Luego, se cortaron las películas en tamaños de 2 cm x 2 cm y 2 cm x 3 cm, tal como se observa en la Figura 3.9b y 3.9c, respectivamente. Posteriormente, se aplicó un voltaje para medir la corriente que circula a través de las películas más pequeñas, como se ilustra en la Figura 3.9d, para obtener el valor de la resistencia se utilizó la siguiente fórmula (ley de Ohm):

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde:

$R = \text{Resistencia}$

$V = \text{Voltaje o tension aplicada}$

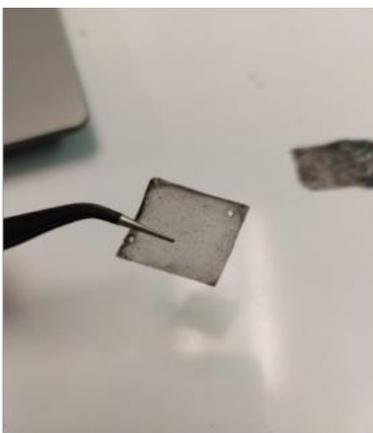
$I = \text{Corriente}$

Figura 3. 9

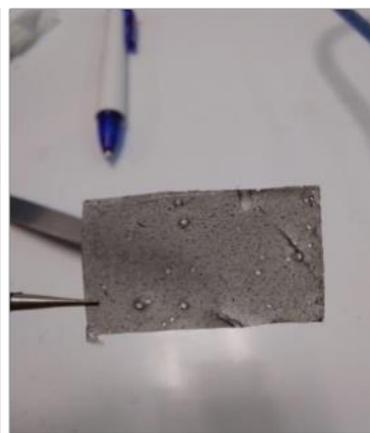
Muestras de películas resistivas de resina de silicio.



a) Medición de conductividad eléctrica películas de 2x22 cm



b) Película de 2x2



c) Película de 2x3



d) Toma de muestra de corriente sobre películas

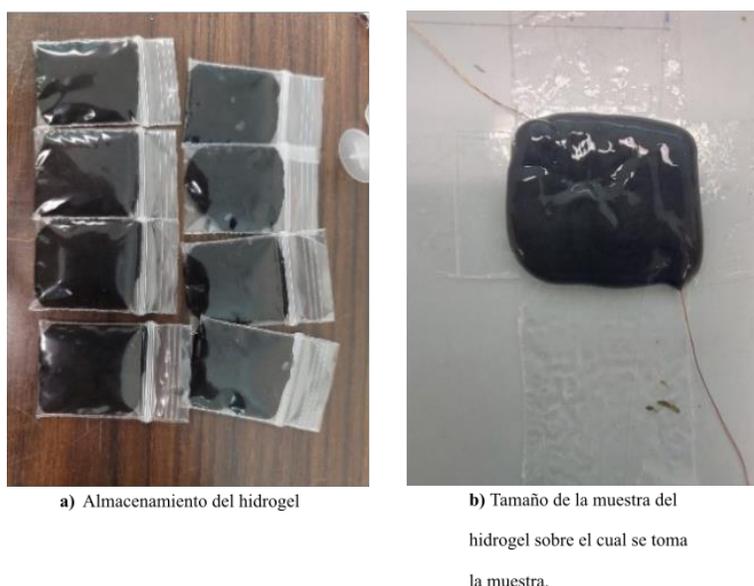


e) Clasificación de la películas

Para conocer la resistencia del hidrogel elaborado primeramente se realizan muestras de 1 ml de hidrogel (las cuales son almacenadas en pequeñas bolsas siploc para su conservación) estas pequeñas muestras son sometidas a un voltaje para conocer la corriente eléctrica que circula sobre estas para posteriormente hacer un cálculo de la resistencia promedio.

Figura 3. 10

Muestras de hidrogel resistivo.



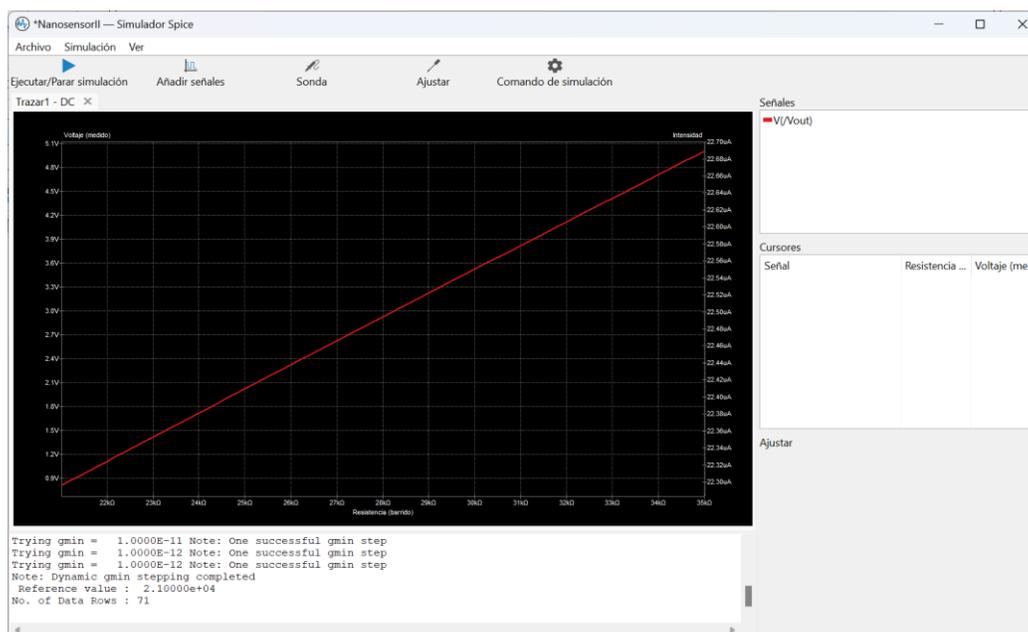
Las resistencias promedio de las películas de resina de silicio y de los hidrogeles nos ayudaran a conocer las resistencias entre las que varían los nanosensores las cuales serán necesarias para poder ajustar las resistencias que conformaran el divisor de tensión para tomar la lectura del sensor elaborado y posteriormente pasar al amplificador operacional.

3.6 Desarrollo de metodología para procesamiento de datos proveniente del nanosensor elaborado

Para la obtención de los datos que fueron tomados del sensor se diseñó un circuito y se simulo en el software KiCad[®] como se muestra en la figura 3.11.

Figura 3. 11

Simulación de circuito.



El diseño de la interfaz para la captura de datos del sensor se implementó en Python[®], y el diagrama de flujo de los procesos operativos se detalla en la Figura 3.12. Para el procesamiento de los datos del sensor, se empleó un microcontrolador cuyo código principal está desarrollado en Python. La comunicación entre el microcontrolador y Python[®] se logró mediante la utilización de la librería Serial en Python. La información adquirida del sensor se almacenó en un archivo de texto para su posterior análisis y manipulación de datos la figura 3.13 muestra aspectos importantes de código en el desarrollo de la interfaz.

Figura 3. 12

Diagrama de flujo de la interfaz gráfica para el nanosensor.

**CODIGO: CAPTURA DE DATOS
PROVENIENTES DE NANOSENSORES**

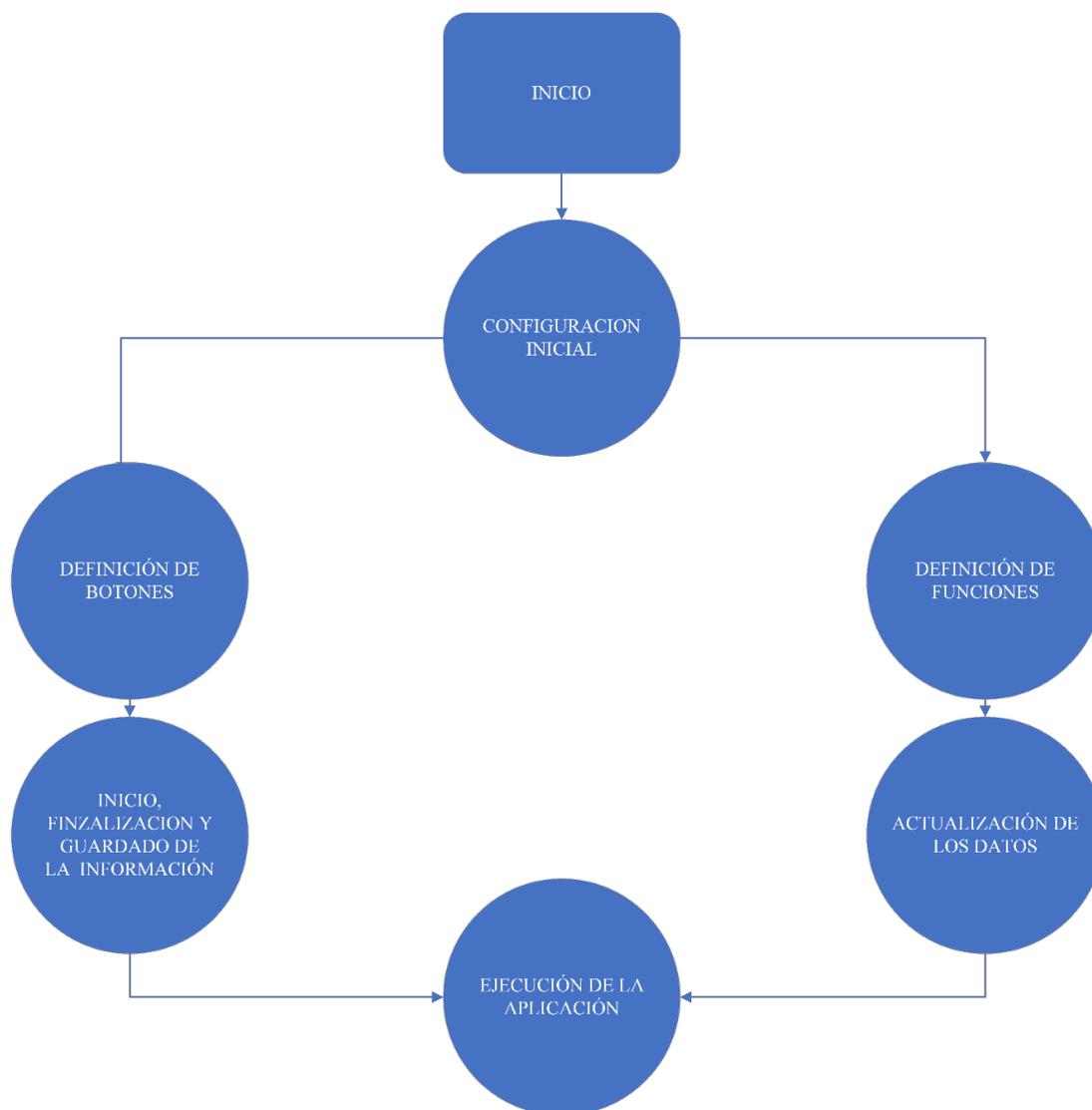


Figura 3. 13

Código a destacar en la interfaz gráfica.

```

a) import sys
import datetime
import serial
import time
import numpy as np
import pyqtgraph as pg
from PyQt5 import QtWidgets, QtCore

b) ser = serial.Serial(port='COM7', baudrate=9600)
time.sleep(1)

c) def resistencia_a_medida(resistencia, medida='cm'):
    # Puntos de datos conocidos
    puntos_resistencia = [22.34,29.89,37.44,44.99,52.54,61, 68, 73, 82.5,91.5,97.85,105.4 ]
    puntos_medida_cm = [1,2,3,4,5,6, 7, 8, 9, 10,11,12 ] # En cm por defecto
    puntos_medida_mm = [10,20,30,40,50,60, 70, 80, 90, 100,110,120] # En mm por defecto

    # Asegurarse de que la resistencia esté dentro del rango conocido
    if resistencia < puntos_resistencia[0]:
        return puntos_medida_cm[0] if medida == 'cm' else puntos_medida_mm[0]
    elif resistencia > puntos_resistencia[-1]:
        return puntos_medida_cm[-1] if medida == 'cm' else puntos_medida_mm[-1]

    # Encontrar el índice del punto de referencia inferior
    for i in range(len(puntos_resistencia) - 1):
        if resistencia >= puntos_resistencia[i] and resistencia <= puntos_resistencia[i + 1]:
            resistencia_previa = puntos_resistencia[i]
            resistencia_siguiente = puntos_resistencia[i + 1]
            medida_previa_cm = puntos_medida_cm[i]
            medida_siguiente_cm = puntos_medida_cm[i + 1]
            medida_previa_mm = puntos_medida_mm[i]
            medida_siguiente_mm = puntos_medida_mm[i + 1]
            # Calcular la interpolación lineal en la nueva unidad de medida
            if medida == 'cm':
                return (resistencia - resistencia_previa) / (resistencia_siguiente - resistenc
            elif medida == 'mm':
                return (resistencia - resistencia_previa) / (resistencia_siguiente - resistenc
    return 0

d) def guardar_datos():
    file_path = "Muestra3.txt"
    with open(file_path, "a", encoding="utf-8") as file:
        try:
            file.write("\n\nMuestra tomada el día {} del mes {} del año {} a las {}:{} con {}
                fecha.day, fecha.month, fecha.year, fecha.hour, fecha.minute, fecha.second) +

            for i in range(len(y_resistencia_vals)):
                resistencia, longitud = y_resistencia_vals[i], y_longitud_vals[i]
                file.write("Resistencia (kΩ): {:.2f}, Longitud (cm): {:.2f}\n".format(resisten
        except Exception as e:
            print(f"Error al escribir en el archivo: {e}")

```

Nota: a) importación de las librerías de Python para el desarrollo del programa que ayuda a recopilar información del sensor, b) configuración del puerto serial para conexión con el microcontrolador, c) creación de la función la cual convierte los datos provenientes del sensor en valores de resistencia, d) configuración para la creación del archivo donde se almacenaran los datos provenientes del sensor para su futura consulta y análisis.

Entre las librerías y módulos para la programación en Python[®] se encuentran los siguientes:

Serial: el cual es un módulo de Python el cual nos permite tener acceso al puerto serial del Arduino[®].

Matplotlib: la cual es una librería que nos permite generación de diversas formas a partir de datos que serán obtenidos por los sensores que se realicen.

Numpy: la cual nos permitirá trabajar diversas funciones matemáticas para operar con ellas los datos que sean recolectados a través del sensor.

Los módulos de *time* y *datetime*: en la cual la primera nos permite conocer el tiempo, la segunda nos permite obtener la fecha y hora, las cuales se utilizan en el desarrollo del programa para que este nos muestre la hora y fecha a la que fue tomada la muestra y así llevar un registro para un mejor control.

El factor de calibración en sensores de deformación, también conocido como factor k o factor de galga, es una constante de proporcionalidad que relaciona la variación de la deformación con la longitud de onda de Bragg en el caso de sensores ópticos de deformación. En el contexto de galgas extensométricas, el factor de calibración (GF) se relaciona con el cambio en la resistencia causado por la tensión sobre la resistencia nativa del sensor, dividida por la propia tensión. Este factor es esencial para configurar el sensor en el software y es un número que generalmente se muestra en el paquete del sensor. En el caso de las galgas extensométricas metálicas en configuración puente de Wheatstone, el factor de proporcionalidad entre la variación relativa de resistencia del sensor y la deformación mecánica es conocido como factor de galga, siendo el parámetro más importante del sensor. Además, se ha desarrollado un método de calibración para minimizar los factores de influencia y establecer las correcciones necesarias en la caracterización dinámica del sensor

Para la calibración del sensor y toma de las muestras en el programa se utilizará la fórmula del factor de calibración el cual es una medida importante en la deformación de materiales y se utiliza comúnmente en la construcción y calibración de sensores de tensión (He et al., 2021). Esta es una constante que relaciona la variación en la resistencia eléctrica del sensor con la deformación que experimenta el material.

Se expresa de la siguiente manera:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

Donde:

$GF =$ Factor del sensor

$\Delta R =$ Cambio en la resistencia R debido a la deformación

$R =$ Resistencia inicial del sensor

$\varepsilon =$ Deformación unitaria o cambio longitudinal

Cálculo del cambio longitudinal

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

- $\Delta L =$ Cambio en la longitud
- $L_0 =$ Longitud inicial del sensor

Tensión

$$\sigma = GF * \varepsilon$$

- $\sigma = \text{Esfuerzo o tension}$

Conocer el factor de calibración es esencial para obtener mediciones precisas en aplicaciones de ingeniería y ciencia de materiales que implican medidas de tensión o deformación.

Para la captura de los datos provenientes del sensor y para que nos indique la deformación o crecimiento que está teniendo el sensor se utilizara la interpolación lineal el cual es un método utilizado en matemáticas para estimar un valor intermedio entre dos puntos conocidos en una serie de datos. Este se basa en la suposición de que la relación entre los valores conocidos es aproximadamente lineal, es decir que los puntos siguen una tendencia lineal.

Este proceso implica tomar dos puntos conocidos $(P1, f(P1))$ y $(P2, f(P2))$, donde $P1$ y $P2$ son los puntos de partida y llegada, respectivamente, $f(P1)$ y $f(P2)$ son los valores correspondientes a esos puntos. Luego se utiliza la ecuación de la recta que pasa a través de estos dos puntos para estimar el valor de f en un punto intermedio de P , donde $P1 < P < P2$.

La ecuación de la recta utilizada para la interpolación lineal es la siguiente:

$$f(P) = f(P1) + (P - P1) * [(f(P2) - f(P1))]$$

Donde:

$f(P) = \text{Valor estimado en el punto intermedio } P$

$f(P1)$ y $f(P2)$ son los valores conocidos en los puntos $P1$ y $P2$

$P1$ y $P2$ son las coordenadas x de los puntos conocidos

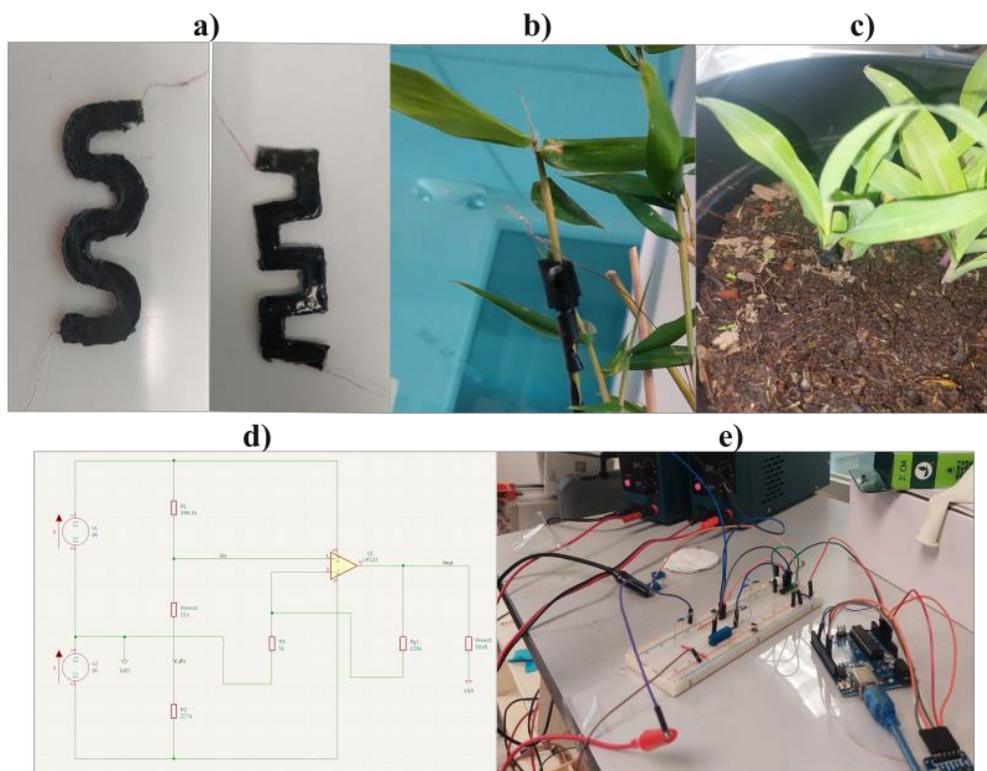
$P = \text{es la coordenada } x \text{ del punto intermedio donde se quiere estimar } f(P)$

3.7 Colocación de sensores para monitoreo en plantas

Los sensores elaborados como se muestra en la figura 3.13a, se colocaron sobre una de las partes del bambú de la familia *bambusa oldhamii* como se muestra en la figura 3.13b y también sobre una planta de maíz, como se muestra en la figura 3.13c. Para la fijación adecuada de los sensores, se utilizó etanol con el fin de ablandar la capa protectora del sensor y facilitar la adhesión a la planta. El diseño del circuito se presenta en la figura 3.13d, el cual consta de un divisor de tensión el cual va conectado a un amplificador operacional (LM324). Una vez que los sensores se colocaron en su posición adecuada, se conectaron al circuito que se muestra en la figura 3.13e, por medio del cual se registraron las variaciones en resistividad en el microcontrolador (Microchip ATmega328P, dentro de un Arduino Uno). Es importante mencionar que la adquisición de datos desde el circuito diseñado se realiza por medio del convertidor analógico-digital integrado en el microcontrolador, el cual cuenta con 10 bits de resolución, lo que permitió capturar 1028 valores para medir las variaciones de resistividad del nanosensor.

Figura 3. 14

Implementación del sensor.



Nota: a) sensores obtenidos del compuesto y la mezcla, b) sensor colocado sobre bambú, c) sensor colocado sobre maíz d) esquemático del circuito utilizado para medición del sensor, e) circuito implementado para medición del sensor conectado a las fuentes y al microcontrolador para la recolección de la información.

Capítulo 4 Resultados y Discusión

La Tabla 3.1 presenta una recopilación de películas resistivas fabricadas con resina de silicio, divididas en dos categorías identificadas como V y B. En cada una de estas categorías, se aplicaron dispersiones SWCNTs con el propósito de investigar la posible influencia de este proceso en la conductividad de las películas. Este estudio buscó determinar si la variación en el tipo de material utilizado como sustrato para la dispersión de SWCNTs tenía un impacto significativo en las propiedades conductivas de las películas resultantes.

Tabla 4. 1

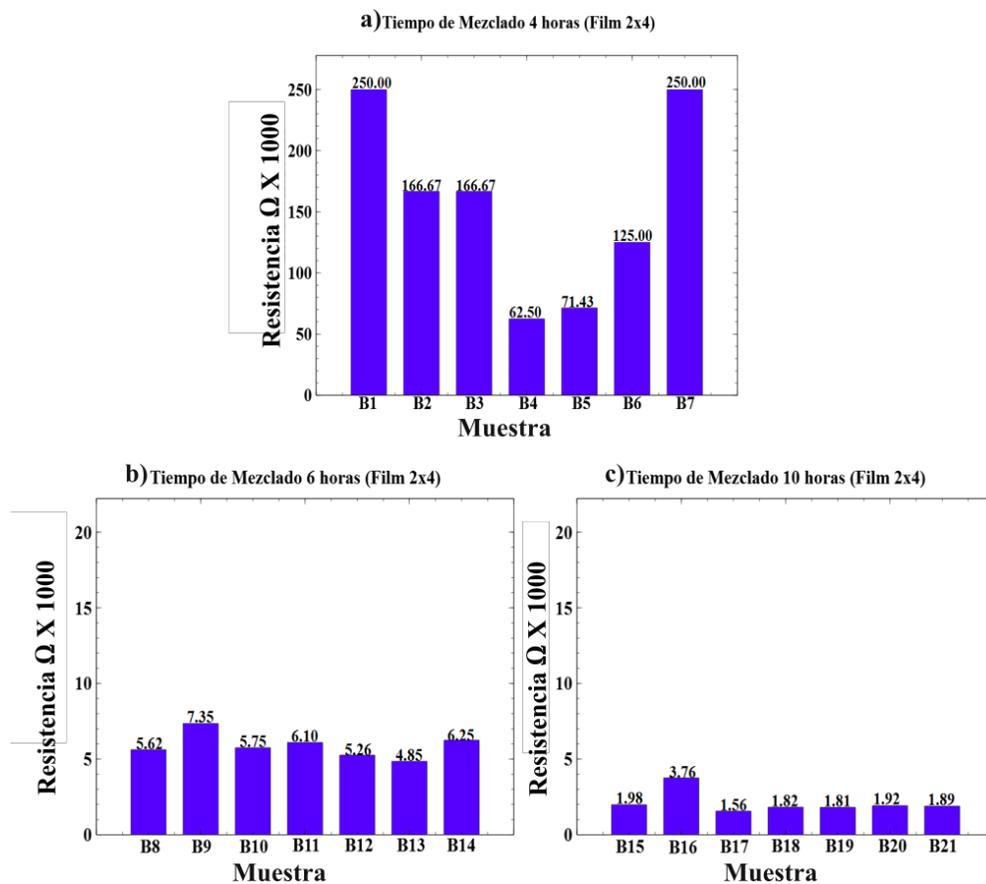
Muestras de películas resistivas elaboradas a base de resina de silicio

Nanomaterial	Disolvente	Tiempo de mezclado	Muestras
Nanotubos 10 mg	Triton X-100 15 ml	4 horas	V1 - V7
		6 horas	V8 - V15
		10 horas	V16 – V20
		4 horas	B1 - B7
		6 horas	B8 - B14
		10 horas	B15 - B21

Las siguientes gráficas muestran los resultados de las mediciones de las dispersiones que fueron elaboradas por diferentes periodos de tiempo, los resultados se expresan en kilohms ($k\Omega$), determinados mediante la Ley de Ohm.

Figura 4. 1

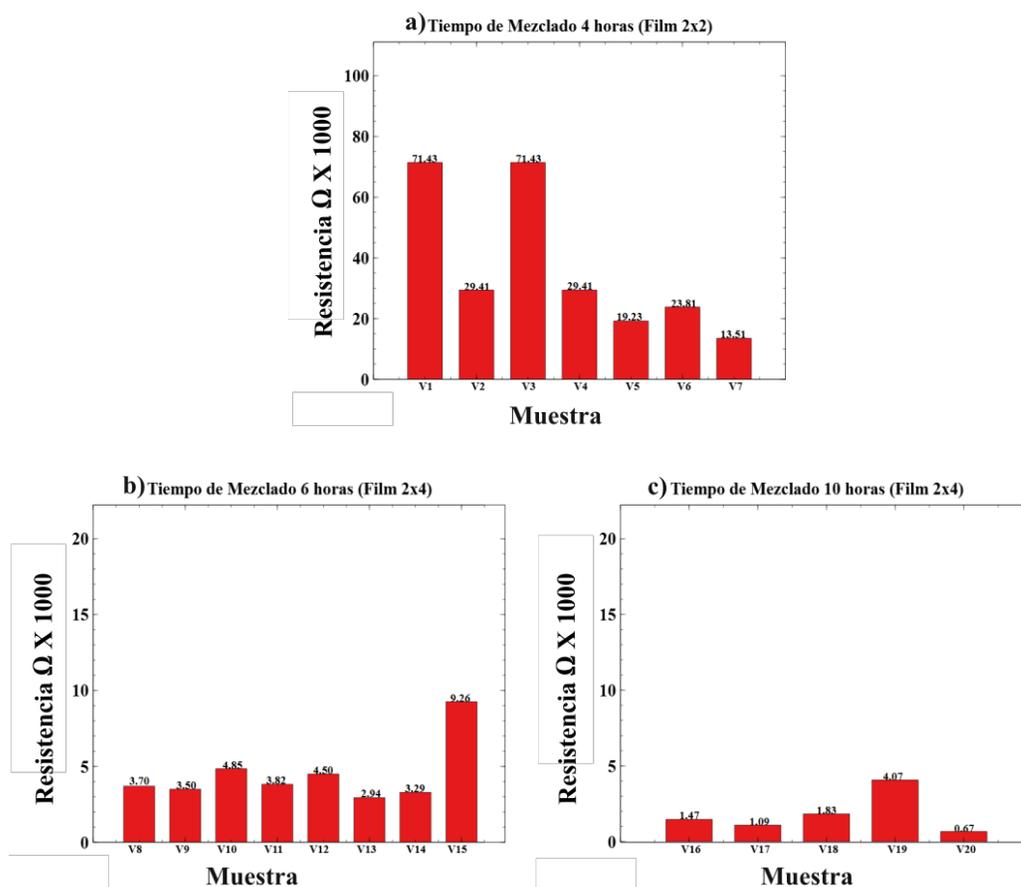
Evaluación de resistencia de las dispersiones en sustratos B.



Nota: a) dispersión que se mezcló por 4 horas, b) dispersión que se mezcló por 6 horas, c) dispersión que se mezcló por 10 horas.

Figura 4. 2

Evaluación de resistencia de las dispersiones en sustratos V.



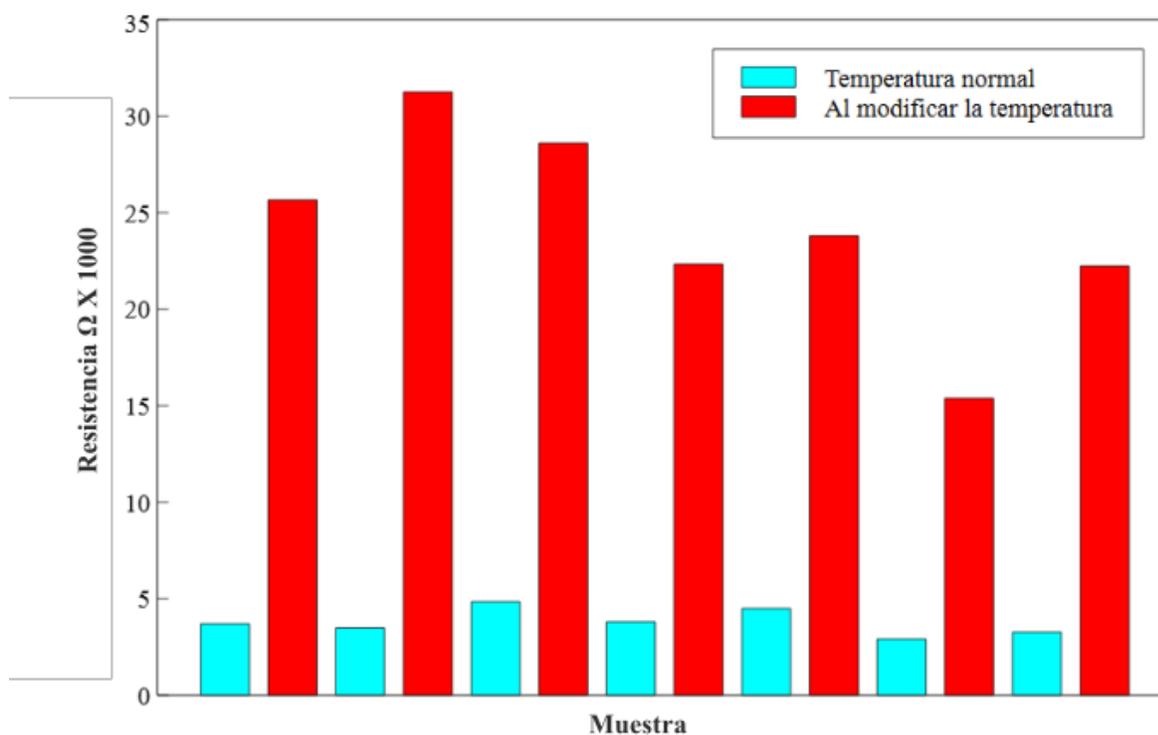
Nota: a) dispersión que se mezcló por 4 horas, b) dispersión que se mezcló por 6 horas, c) dispersión que se mezcló por 10 horas.

Los resultados de las dispersiones indican que a medida que aumenta el tiempo de dispersión, la conductividad aumenta y, en consecuencia, la resistencia disminuye. Además, se observa que la resistencia varía dependiendo del material sobre el que se aplica la dispersión. Por ejemplo, en la Figura 4.1, el material de la resina de silicio identificado como 'V' muestra una resistencia más baja en comparación con el material identificado como 'B' en la Figura 4.2. Así mismo en este

método se evaluó el cambio en la resistencia en este tipo de películas ya que los nanotubos se encuentran expuestos al medio ambiente los resultados de esta evaluación se presentan en la figura 4.3, donde se puede observar cómo al modificar la temperatura en la habitación la resistencia del sensor se ve influenciada al no tener una capa protectora que lo aislé de este cambio.

Figura 4. 3

Monitoreo de la resistencia en películas de SWCNTs al modificar la temperatura.



En la elaboración de los hidrogeles, se prepararon varias dispersiones utilizando diferentes materiales y tiempos de dispersión, como se detalla en la Tabla 3.2. Por otro lado, la Figura 4.4 presenta los resultados de los cambios en la resistencia, destacando que el hidrogel con la mayor variación en resistencia al estirarse fue aquel en el que los nanotubos se dispersaron con Tritón X-100.

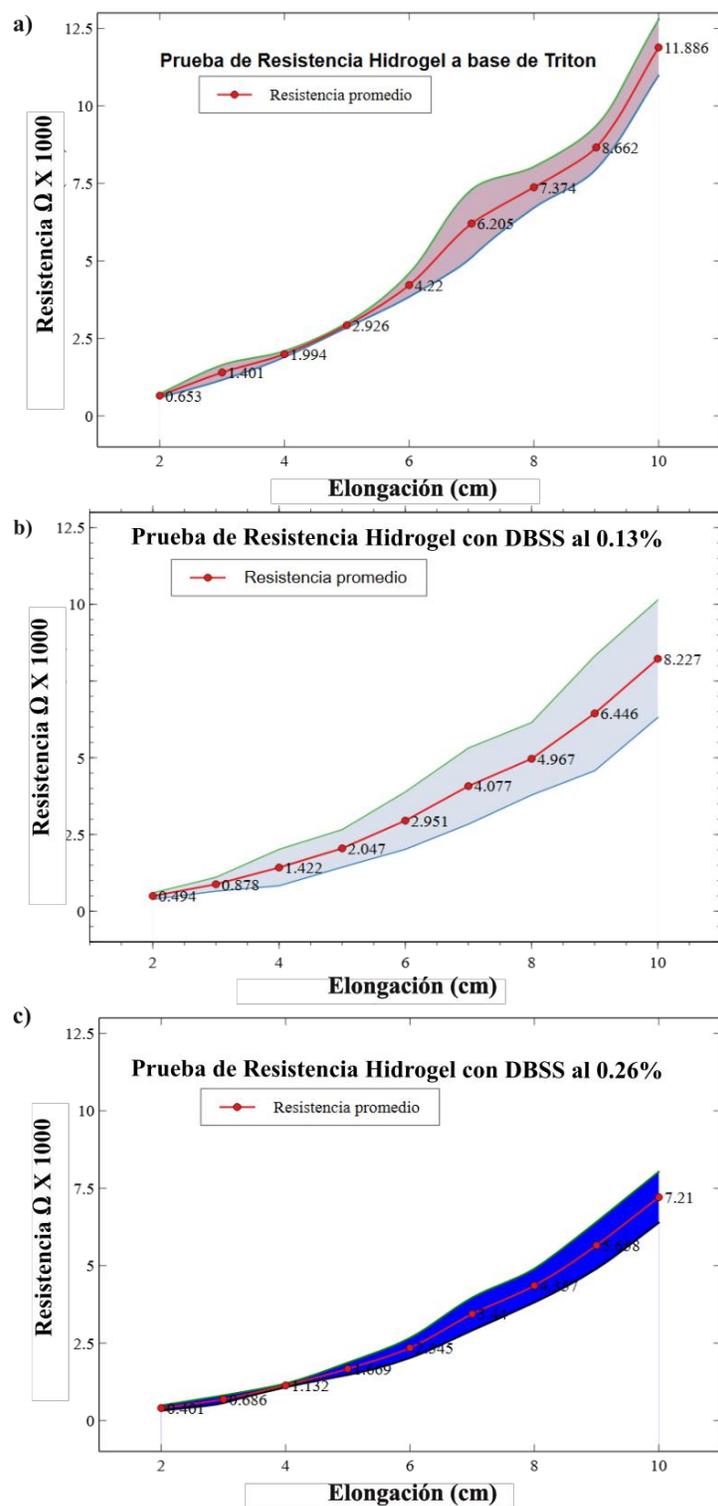
Tabla 4. 2
Elaboración de hidrogeles a base de diferentes mezclas

Dispersión			Hidrogel				Resultados
Nanomaterial	Disolvente	Tiempo de mezclado	Material	Disolvente	Electrolito	Tiempo de Elaboración	
Nanotubos 10 mg	Triton X-100 15 ml	10 horas	8 mg PVA	200 ml de Agua destilada	1 ml de bórax al 0.025%	13 horas	El hidrogel mostro mejor incremento en la resistencia al someterse a estiramiento.
	Agua destilada 15 ml/ DBSS al 0.13%						El hidrogel muestra un incremento a la resistencia mejor que el que contiene 2 mg de DBSS y este no genero espuma.
	Agua destilada 15 ml/ DBSS 0.26%						El hidrogel genero espuma en la elaboración, poco incremento en la resistencia al someterse al estiramiento.

Nota: el tiempo de dispersión es de 10 horas ya que si se deja menos tiempo la mezcla no es homogénea, para establecer la cantidad de PVA a utilizar se hicieron varias mezclas previas para ver su elaboración.

Figura 4. 4

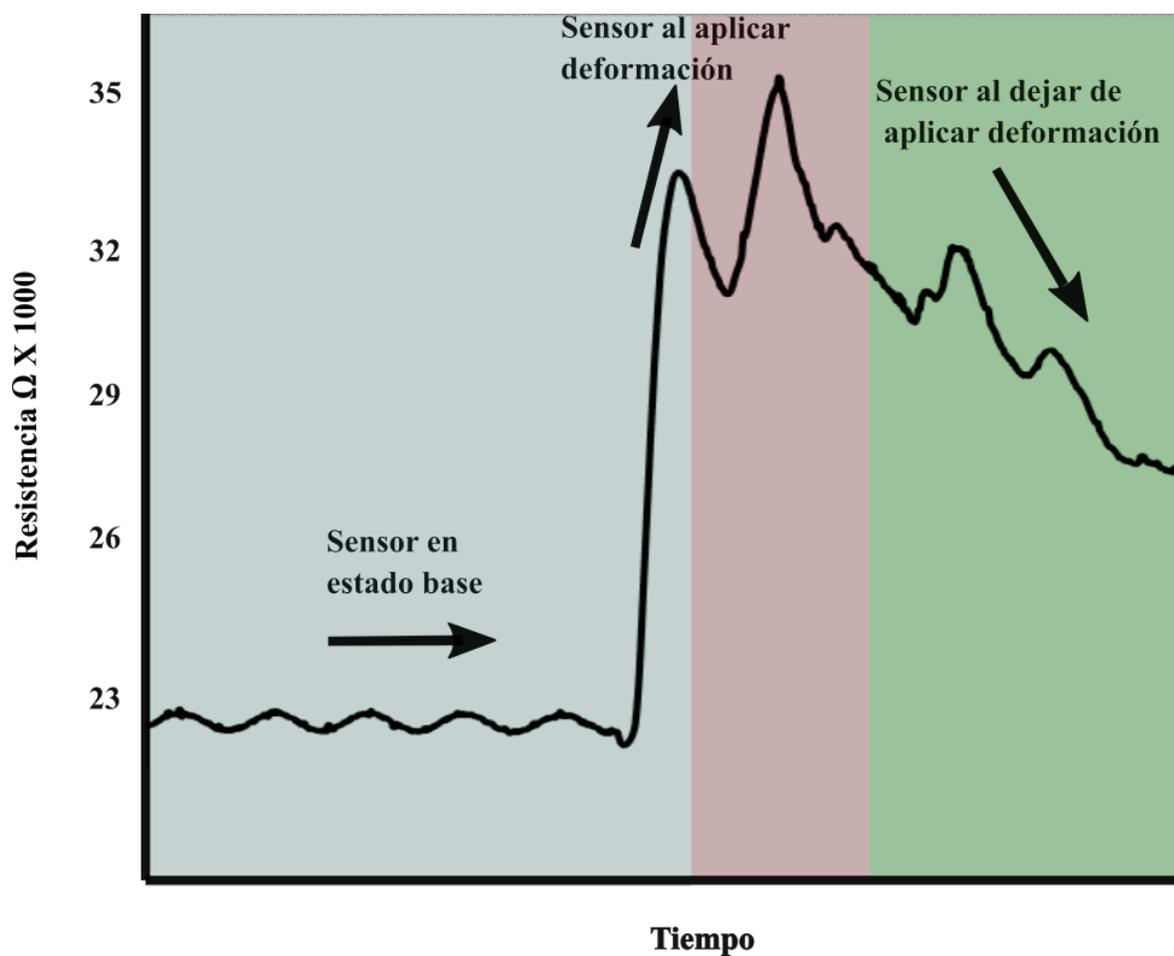
Hidrogeles elaborados con diferentes dispersiones.



La respuesta temporal de la resistencia del sensor ante la aplicación de deformaciones manuales se muestra en la Figura 4.5. La zona azul muestra el estado inicial de resistencia del sensor, mientras que la zona rosa muestra los cambios en la resistencia del sensor mientras se aplican deformaciones. El comportamiento del sensor después de la eliminación de la deformación se muestra en la zona verde.

Figura 4. 5

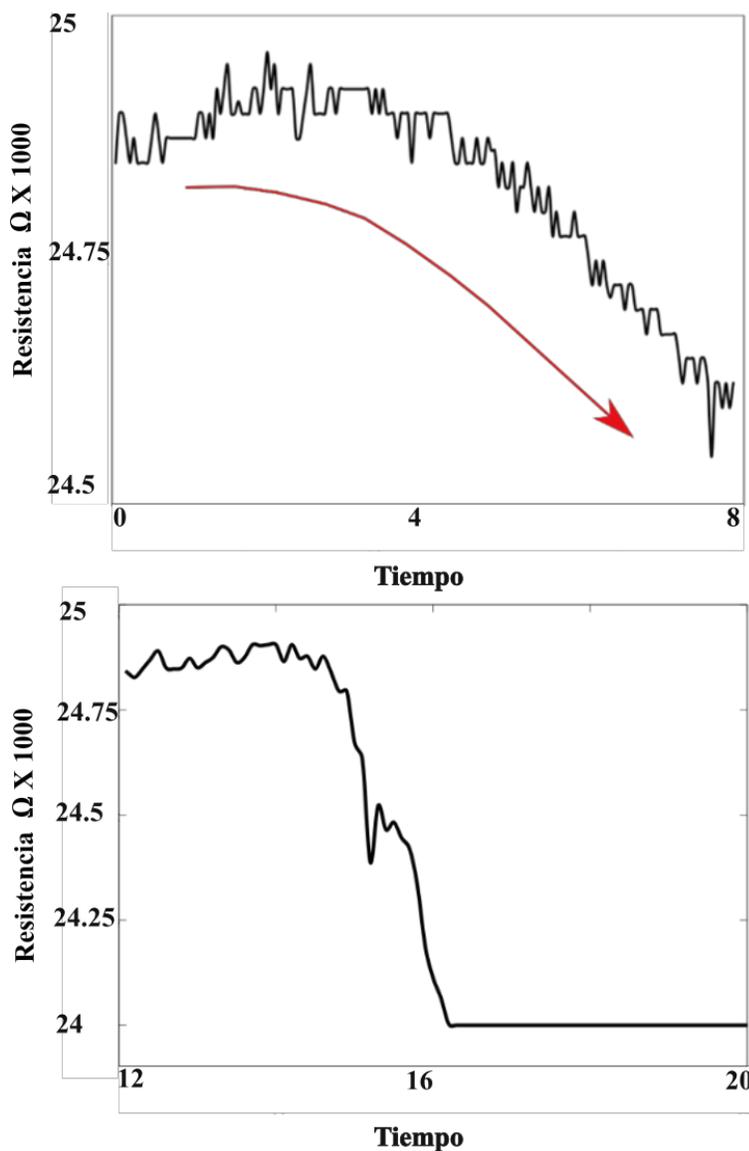
Comportamiento del sensor al ejercer deformaciones manuales.



El comportamiento del sensor cuando no se somete a deformaciones y no se coloca sobre una planta se muestra en la Figura 4.6, que sirve como punto de referencia. El resultado mostrado refleja el promedio de varias pruebas realizadas al sensor. Cuando el sensor no estaba colocado sobre ninguna planta ni se le aplicó ninguna deformación, la resistencia disminuyó.

Figura 4. 6

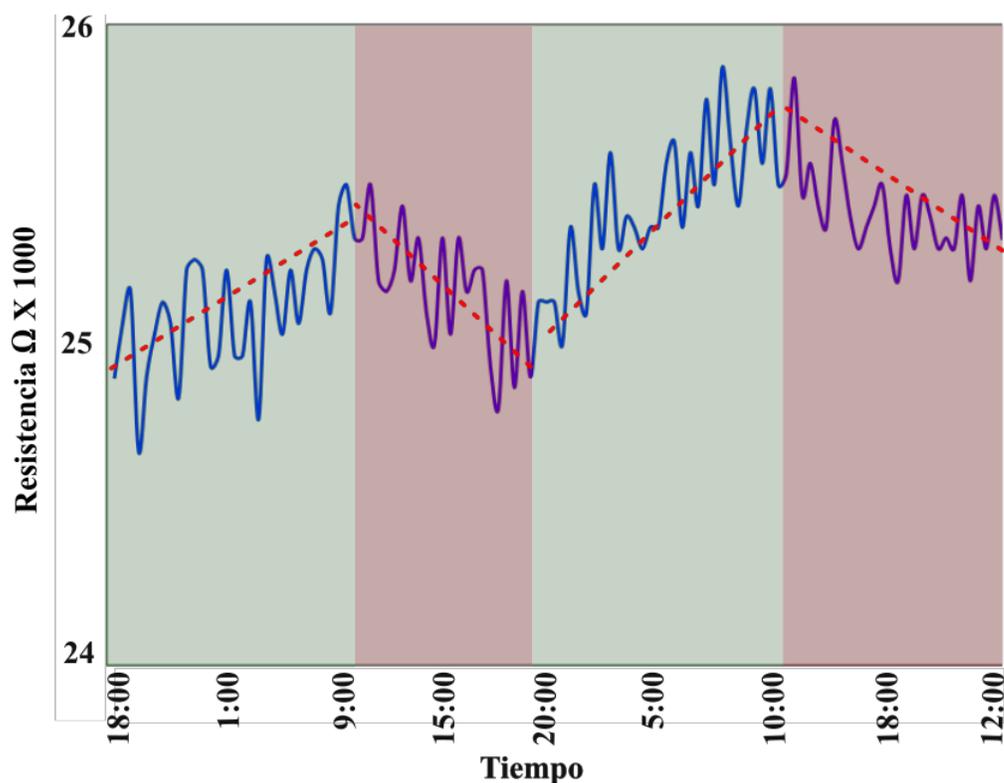
Comportamiento del sensor sin ser colocado en plantas ni aplicar deformaciones.



En cuanto a la Figura 4.7, se muestra el comportamiento del sensor al ser colocado sobre la planta de bambú para monitorear su crecimiento mediante la detección de la extensión mecánica. La zona en color verde indica los períodos de aumento de la resistencia del sensor, correlacionados con el crecimiento de la planta, mientras que la zona en color rojo representa los períodos de reducción de la resistencia, asociados con fases de estancamiento en el crecimiento de la planta. El sensor se colocó a las 18:00 h del día 1 y se muestreó cada 30 minutos durante un período de 2 días y medio.

Figura 4. 7

Comportamiento de la resistencia del sensor colocado sobre bambú respecto al tiempo.



En la parte superior de la Figura 4.8, se presentan fotografías tomadas a diario, mientras que en la parte inferior se muestran imágenes capturadas cada 3 días, permitiendo un seguimiento visual exhaustivo del crecimiento del bambú

Figura 4. 8

Monitoreo de crecimiento del bambú con respecto al tiempo.



En la Figura 4.9, se presentan fotografías que documentan el crecimiento diario del maíz, lo que permite un seguimiento detallado de su desarrollo a lo largo del tiempo. Por otro lado, la Figura 4.10 muestra los cambios en la resistencia del sensor que fue colocado en el maíz, proporcionando una representación gráfica de la variación de la respuesta del sensor en relación con el crecimiento de la planta en color rosado los periodos en los que la planta se relaja y no crece y en verde el periodo de crecimiento el cual es llevado durante la tarde-noche.

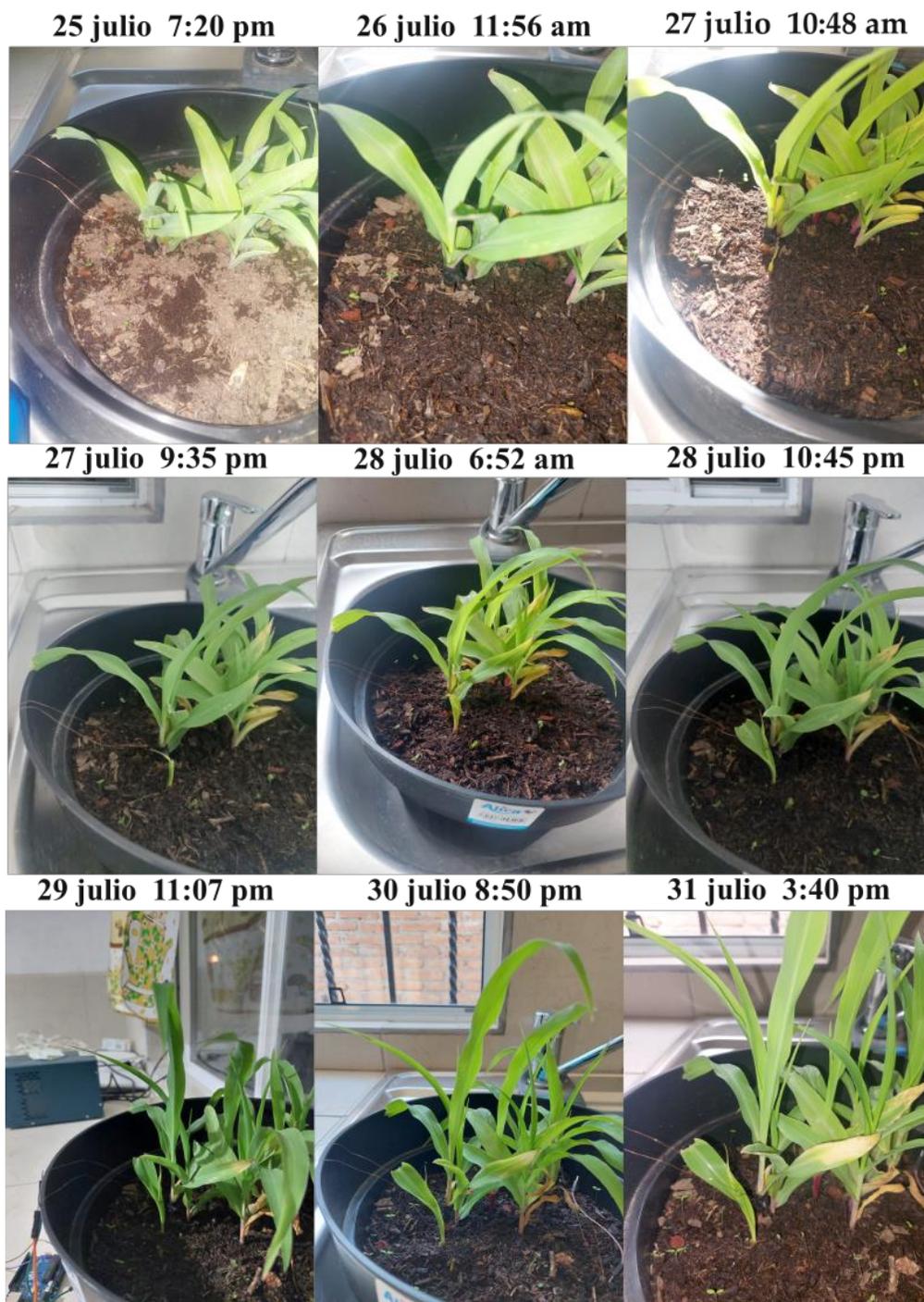
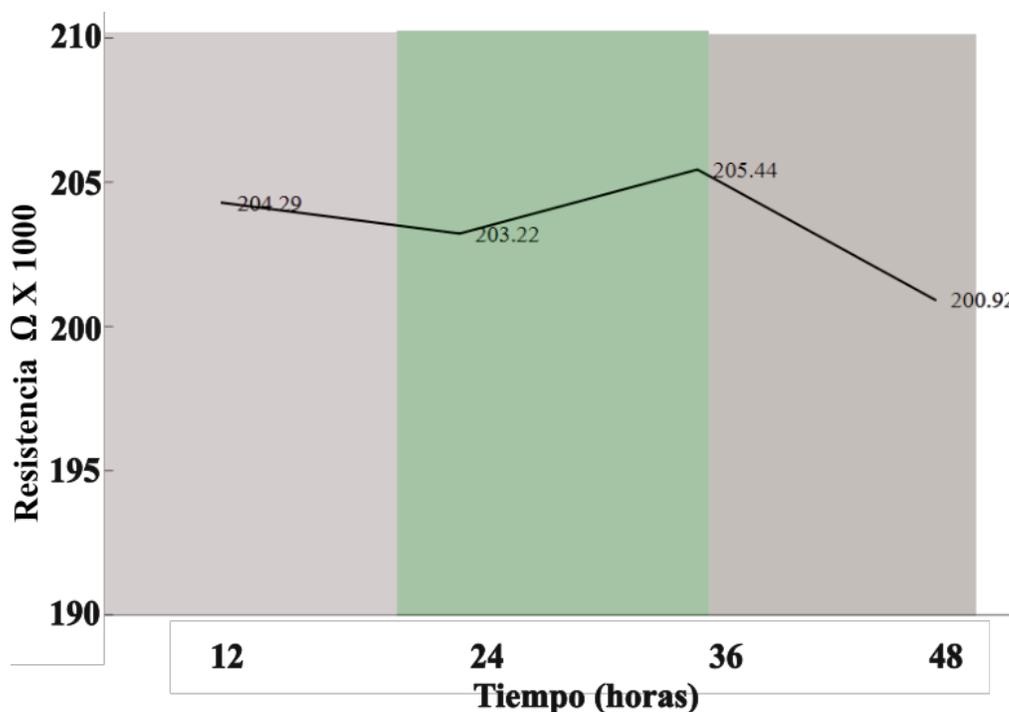
Figura 4. 9*Monitoreo de crecimiento de maíz.*

Figura 4. 10

Comportamiento de la resistencia del sensor colocado sobre maíz respecto al tiempo.



La Figura 4.11 ilustra la compatibilidad observada entre los sensores desarrollados y las plantas, evidenciada por el continuo crecimiento de las plantas incluso después de la colocación de los sensores. Se destaca que las zonas en las que se ubicaron los sensores no mostraron signos de sequedad, indicando una integración exitosa y no invasiva de los dispositivos de monitoreo con el entorno de las plantas ya que usualmente los dispositivos sensores electrónicos convencionales tienden a bloquear el transporte de aire/luz/agua/nutrientes y perturbar la viabilidad a largo plazo de la planta.

Figura 4. 11

Biocompatibilidad de los sensores colocados sobre plantas.

a)**b)**

Nota: a) sensor que se colocó sobre bambú b) sensor que se colocó sobre maíz.

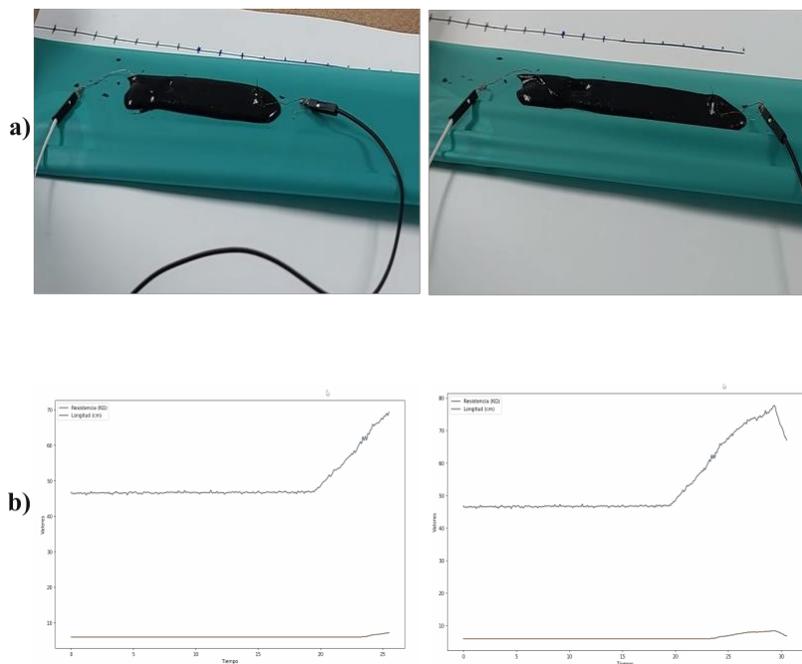
El código implementado se utilizó para el desarrollo de una aplicación que adquiere datos de un puerto serie USB, los cuales representan valores de resistencia. Estos datos se utilizan para generar gráficos en tiempo real que visualizan tanto la resistencia como la longitud calculada a partir de estos valores, como se muestra en la Figura 4.12b. La aplicación ofrece la funcionalidad de iniciar y detener la adquisición de datos mediante botones en la interfaz, tal como se muestra en la Figura

4.13a. Además, se ha implementado la capacidad de guardar los datos adquiridos en un archivo de texto específico, que incluye un encabezado con la fecha y hora de la muestra, así como los valores de resistencia y longitud correspondientes.

La interfaz de la aplicación se desarrolla utilizando PyQt5, mientras que los gráficos en tiempo real se generan mediante la biblioteca pyqtgraph. La aplicación utiliza un temporizador para adquirir y actualizar los datos de forma periódica. Los datos adquiridos se almacenan en listas para su posterior representación y también se utilizan para escribir en un archivo de texto, tal como se muestra en la Figura 4.13b.

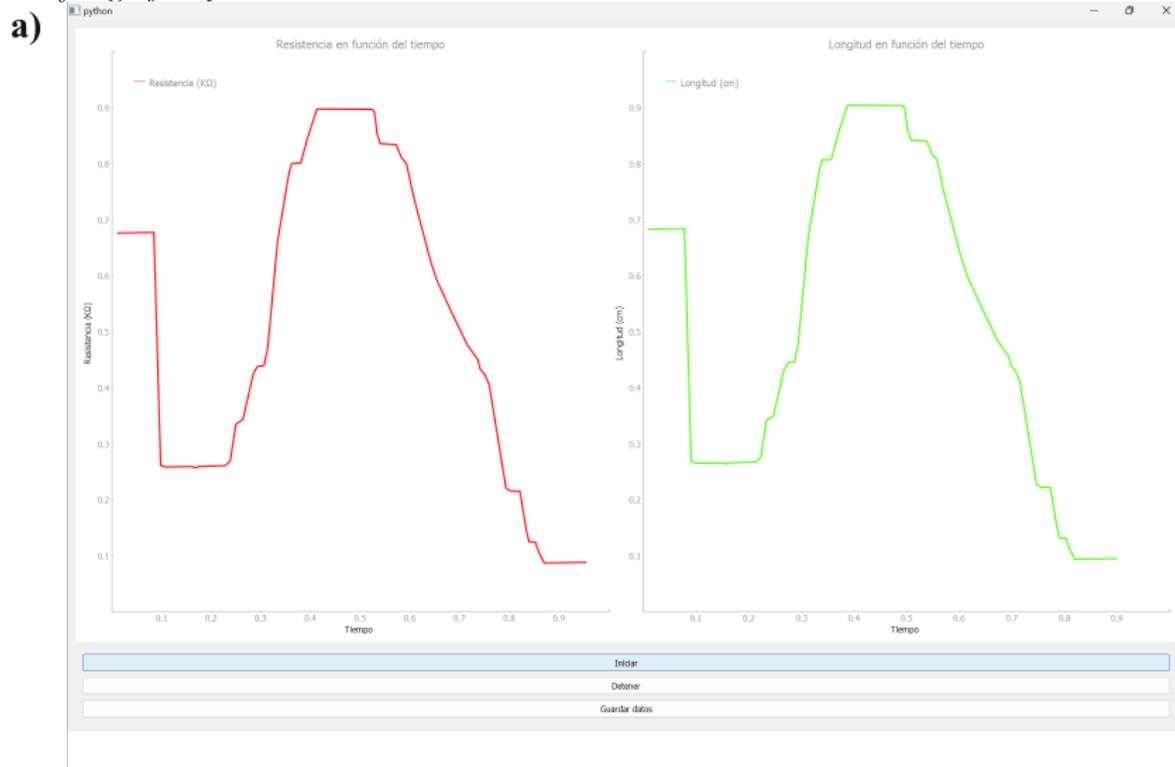
Figura 4.12

Respuesta del sensor al ser sometido a deformación.



Nota: La respuesta se presenta de la siguiente manera: a) una representación visual que muestra cómo se sometió el sensor a estiramiento, y b) una representación gráfica que ilustra la respuesta del sensor ante la deformación. En el gráfico, la línea azul indica el cambio en la resistencia, mientras que la línea naranja refleja el cambio longitudinal en el sensor.

Figura 4. 13
Interfaz gráfica y resultados.



b)

```
Muestra tomada el día 1 del mes 11 del año 2023 a las 11:16 con 34 segundos
Resistencia (KΩ): 48.39, Longitud (cm): 4.45
Resistencia (KΩ): 48.88, Longitud (cm): 4.51
Resistencia (KΩ): 49.46, Longitud (cm): 4.59
Resistencia (KΩ): 49.85, Longitud (cm): 4.64
Resistencia (KΩ): 50.24, Longitud (cm): 4.70
Resistencia (KΩ): 50.73, Longitud (cm): 4.76
Resistencia (KΩ): 51.22, Longitud (cm): 4.83
Resistencia (KΩ): 51.91, Longitud (cm): 4.92
Resistencia (KΩ): 52.10, Longitud (cm): 4.94
Resistencia (KΩ): 52.59, Longitud (cm): 5.01
Resistencia (KΩ): 53.08, Longitud (cm): 5.06
```

Nota: a) muestra el diseño de la interfaz gráfica, y b) presenta los resultados obtenidos al hacer clic sobre el botón 'Guardar datos'.

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

El tiempo de secado del hidrogel depende de las condiciones ambientales como lo son la temperatura y humedad, además de que el tiempo de secado depende del grosor de la capa y la humedad presente en el hidrogel, además teniéndose en cuenta que la adición de la glicerina ayuda a mantener la humedad del hidrogel, lo que nos ayudaría a retardar el proceso de secado, por su parte la adición de dispersión de nanotubos puede hacer que la mezcla sea más densa retardando el tiempo de secado.

La funcionalización no covalente no destruye el sistema conjugado de las paredes laterales y la tapa del extremo de los CNTs, siendo este un método alternativo para mejorar las propiedades interfaciales de los nanotubos. Las dispersiones de SWCNTs dispersados en Triton X-100 por diferentes periodos de agitación constante, fueron sometidas a pruebas de conductividad al rociarlas sobre sustratos de resina de silicio. Los resultados mostrados en las Figuras 4.1 y 4.2 indicaron que la dispersión preparada por un tiempo de mezclado de 10 horas exhibe una mejor conductividad eléctrica y una menor resistencia, por lo cual se decidió utilizarla para elaborar el composito final del sensor. Con el composito elaborado, se obtuvieron los sensores mostrados en la Figura 3.14 a, los cuales mostraron una buena conductividad eléctrica, exhibiendo cambios en su resistencia al aplicar deformaciones manuales como se muestra en la Figura 4.5, las cuales permiten conocer su comportamiento de respuesta al ser sometido a estas deformaciones.

Se ha comprobado que, aunque el crecimiento de las plantas de estudio no genera una deformación significativa en el sensor, se puede percibir un cambio positivo en la línea de tendencia como se ilustra en las figuras 4.7 y 4.10. Es posible apreciar un crecimiento de la planta de estudio durante la tarde y madrugada, donde de acuerdo con el tipo de bambú (en este caso, perteneciente a la familia bambusa oldhamii) corresponde adecuadamente a periodos en el día en el que su

crecimiento suele ser mayor (Guadua Bamboo SAS, 2020). En el caso del maíz este se ve influenciado por la cantidad de luz solar que recibe, así como las condiciones ambientales a las que está expuesto, siendo durante la noche donde la planta utiliza las reservas de glucosa que acumula durante el día para llevar a cabo procesos metabólicos y de crecimiento. Además, para el monitoreo del crecimiento de la planta, se midió el grueso del tallo por medio de un vernier, resultando en una circunferencia de 3.1 mm y altura de 13.7 cm, contra una circunferencia de 3.4 mm y una altura de 15.59 cm medidas al tercer día.

En nuestro proceso experimental en la figura 4.11 se enfatiza una relación armoniosa entre los sensores y las plantas, lo que sugiere que los sensores no interfirieron con el crecimiento normal de las plantas y no afectaron negativamente su salud o desarrollo. Esto refuerza la idea de que los sensores son efectivos y no invasivos, lo que puede ser un punto clave en la validación y la aplicabilidad práctica de los mismos en entornos agrícolas o de investigación.

En comparación con las pruebas en las que se aplicaron deformaciones manuales al sensor, el cambio en la planta es menor, sin embargo, fueron detectables y cuantificables por medio del nanosensor desarrollado. Así mismo, como se ilustra en la figura 4.6, el comportamiento del sensor en estado estático (es decir, al no ser sometido a deformaciones) muestra que su resistencia tiende a disminuir hacia un valor mínimo, lo cual demuestra que las curvas de respuesta obtenidas, en donde se observan incrementos de resistividad, pueden ser efectivamente atribuidas al crecimiento de la planta.

En este punto es importante contrastar nuestro trabajo con otros relacionados. Por ejemplo, en un trabajo reciente (Tang et al., 2019) se desarrolló un sensor a base de CNT y grafito utilizando como película un pedazo de látex, para ser colocado sobre frutos para la medición de su crecimiento, la incorporación de los electrodos de este sensor fue mediante el uso de cinta, al igual que el sensor

desarrollado en este trabajo es portátil y flexible. Lo que diferencia a nuestro sensor es que nuestra propuesta incorpora los electrodos dentro del sensor, lo que evitaría el movimiento de los electrodos y posibles interferencias de ruido que puedan interferir en la señal medida. Así mismo, nuestro sensor con la capa de PVAc se protege de la humedad evitando así que este se pueda ver afectado por el riego al que son sometidos los cultivos para su desarrollo. Otro punto importante es que, en el trabajo citado, los CNT fueron adquiridos como tinta comercial, sobre la cual no se conoce el modo de preparación. En nuestro caso, se están utilizando SWCNTs puros para la preparación de la dispersión, y al ser utilizados de este modo permite la funcionalización para en el futuro poder utilizarlos para la detección de otras sustancias.

La implementación de este sensor a base de nanomateriales podría tener un impacto significativo en el cuidado de los cultivos ya sea para el monitoreo del crecimiento de las plantas cultivadas, así como para el monitoreo de diferentes variables fisiológicas y morfológicas al modificar los nanosensores para la detección de estas. Por lo cual, tendría un gran impacto en el desarrollo rural y económico de las áreas agrícolas de los estados de nuestro país. La capacidad de monitorear de manera precisa y en tiempo real el crecimiento de las plantas permitiría tomar decisiones más informadas y oportunas sobre su cuidado, lo que podría aumentar la calidad y la producción de los cultivos y así mejorar la rentabilidad de la agricultura. Por otro lado, es importante tener en consideración los posibles desafíos que pueden surgir durante la implementación del sensor en el campo, donde se requiere asegurar la estabilidad y durabilidad en los diferentes entornos en los que se encuentran los cultivos. El desarrollo e implementación de estos sensores podrían requerir una inversión significativa en investigación y desarrollo, así como en capacitación y educación para su uso, además de que debe seguirse investigando la respuesta de la resistencia de los CNTs

ante la deformación mecánica. No obstante, el potencial beneficio económico y social podría superar ampliamente los costos a largo plazo.

Referencias

- Abdullah, A. M., Aziz, S. B., & Saeed, S. R. (2021). Structural and electrical properties of polyvinyl alcohol (PVA):Methyl cellulose (MC) based solid polymer blend electrolytes inserted with sodium iodide (NaI) salt. *Arabian Journal of Chemistry*, *14*(11), 103388. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103388>
- Arndt, N., Tran, H. D. N., Zhang, R., Xu, Z. P., & Ta, H. T. (2020). Different Approaches to Develop Nanosensors for Diagnosis of Diseases. *Advanced Science*, *7*(24), 2001476. <https://doi.org/10.1002/advs.202001476>
- Aspiazú, I., Sedyama, T., Ribeiro Jr., J. I., Silva, A. A., Concenco, G., Galon, L., Ferreira, E. A., Silva, A. F., Borges, E. T., & Araujo, W. F. (2010). Eficiencia fotosintética y de uso del agua por malezas. *Planta Daninha*, *28*(1), 87–92. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000100011>
- Baruah, S., & Dutta, J. (2009). Nanotechnology applications in pollution sensing and degradation in agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *7*(3), 191–204. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0228-8>
- Cardoso, C., Fernandes, C. S., Lima, R., & Ribeiro, J. (2018). Biomechanical analysis of PDMS channels using different hyperelastic numerical constitutive models. *Mechanics Research Communications*, *90*, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2018.04.007>
- Chitranshi, M., Pujari, A., Ng, V., Chen, D., Chauhan, D., Hudepohl, R., Saleminik, M., Kim, S. Y., Kubley, A., Shanov, V., & Schulz, M. (2020). Carbon Nanotube Sheet-Synthesis and Applications. *Nanomaterials*, *10*(10), 2023. <https://doi.org/10.3390/nano10102023>
- El Barachi, M., Rahman, S. A., Mourad, A., & Orabi, W. Al. (2020). Nanosensors for traffic condition monitoring. In *Nanosensors for Smart Cities* (pp. 187–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819870-4.00011-6>
- Ferrier, D. C., & Honeychurch, K. C. (2021). Carbon Nanotube (CNT)-Based Biosensors. *Biosensors*, *11*(12), 486. <https://doi.org/10.3390/bios11120486>
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*, *20*(4), 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- Godínez-García, F. J., Guerrero-Rivera, R., Martínez-Rivera, J. A., Gamero-Inda, E., & Ortiz-Medina, J. (2023). Advances in two-dimensional engineered nanomaterials applications for the agro- and food-industries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(11), 5201–5212. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12556>
- Guadua Bamboo SAS. (2020). *El Bambú es la Planta de Más Rápido Crecimiento del Planeta*. El Bambú Es La Planta de Más Rápido Crecimiento Del Planeta. <https://bit.ly/3oM61p8>

- Gupte, T., & Pradeep, T. (2022). *Nanosensors for water quality monitoring* (pp. 37–53). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90763-7.00010-X>
- He, S., Hong, Y., Liao, M., Li, Y., Qiu, L., & Peng, H. (2021). Flexible sensors based on assembled carbon nanotubes. *Aggregate*, 2(6). <https://doi.org/10.1002/agt2.143>
- Himshweta, & Singh, M. (2023). Nanosensor platforms for detection of milk adulterants. *Sensors and Actuators Reports*, 5, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2023.100159>
- Hussain Chaudhery Mustansar. (2018). *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications* (Chaudhery Mustansar Hussain, Ed.). ELSEVIER. <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=6TtmDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Handbook+of+Nanomaterials+for+Industrial+Applications&ots=Ax4NLMtgMd&sig=12DFnkNdav7S81Crww9J7TDb-PI#v=onepage&q&f=false>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022, December 7). *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*. Cifras Preliminares 2021. <https://bit.ly/3LgbrQG>
- J. Trinidad Sáenz Reyes, H. Jesús Muñoz Flores, Cristian Miguel Ángel Pérez D, Agustín Rueda Sánchez, & Jonathan Hernández Ramos. (2014). *Plant quality of three pine species of "Morelia" nursery at Michoacán state*.
- Janssen, J., Lambeta, M., White, P., & Byagowi, A. (2019). Carbon Nanotube-Based Electrochemical Biosensor for Label-Free Protein Detection. *Biosensors*, 9(4), 144. <https://doi.org/10.3390/bios9040144>
- Ji, Z., Guo, W., Sakkiah, S., Liu, J., Patterson, T., & Hong, H. (2021a). Nanomaterial Databases: Data Sources for Promoting Design and Risk Assessment of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(6), 1599. <https://doi.org/10.3390/nano11061599>
- Ji, Z., Guo, W., Sakkiah, S., Liu, J., Patterson, T., & Hong, H. (2021b). Nanomaterial Databases: Data Sources for Promoting Design and Risk Assessment of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(6), 1599. <https://doi.org/10.3390/nano11061599>
- Kalidas, S., & Sumathi, S. (2023). Mechanical, biocompatibility and antibacterial studies of gelatin/polyvinyl alcohol/silkfibre polymeric scaffold for bone tissue engineering. *Heliyon*, 9(6), e16886. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16886>
- Kamari, M., Kumar, N., Motaung, D. E., Issaoui, N., Kumar, S., & Rani, G. (2023). Nanosensors for crop protection. In *The Impact of Nanoparticles on Agriculture and Soil* (pp. 323–349). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91703-2.00003-8>
- Khalid, M. F., Iqbal Khan, R., Jawaid, M. Z., Shafqat, W., Hussain, S., Ahmed, T., Rizwan, M., Ercisli, S., Pop, O. L., & Alina Marc, R. (2022). Nanoparticles: The Plant Saviour under Abiotic Stresses. *Nanomaterials*, 12(21), 2–7. <https://doi.org/10.3390/nano12213915>
- Kharlamova, M. V., Paukov, M., & Burdanova, M. G. (2022). Nanotube Functionalization: Investigation, Methods and Demonstrated Applications. *Materials*, 15(15), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ma15155386>

- Khazaei, M., Hosseini, M. S., Haghighi, A. M., & Misaghi, M. (2023). Nanosensors and their applications in early diagnosis of cancer. *Sensing and Bio-Sensing Research*, *41*, 100569. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2023.100569>
- Kumar, A. A., Kumar, S. K. N., & Fernandez, R. E. (2021). Real Time Sensing of Soil Potassium Levels Using Zinc Oxide-Multiwall Carbon Nanotube-Based Sensors. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, *20*(1), 50–56. <https://doi.org/10.1109/TNB.2020.3027863>
- Kumar Khanna, V. (2021). *Nanosensors: Physical, Chemical, and Biological; Second Edition*.
- Liu, T., Baggett, R., Lang, K., Padilla, D. J., Patel, R. J., Berry, J., Eldredge, R. L., Robledo, C. J., Bowen, W., Landorf, C. W., Kayastha, V., Nelson, M., & Zhu, J. (2023). Functionalized carbon nanotubes enabled flexible and scalable CO₂ sensors. *Carbon Trends*, *12*, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100291>
- Miranda, I., Souza, A., Sousa, P., Ribeiro, J., Castanheira, E. M. S., Lima, R., & Minas, G. (2021). Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review. *Journal of Functional Biomaterials*, *13*(1), 2. <https://doi.org/10.3390/jfb13010002>
- Namikuchi, E. A., Gaspar, R. D. L., Raimundo, I. M., & Mazali, I. O. (2023). A fluorescent magnetic core–shell nanosensor for detection of copper ions in natural waters. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *300*, 122915. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122915>
- Nanomateriales S.A. de C.V. (2015). *Prospectiva Tecnológica en Nanotecnología en Materiales de Conductores y Aislantes utilizados en la Fabricación de Equipo de Generación y Transmisión Eléctrica*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/58973/36-0443_Nanomateriales_S.A._de_C.V..pdf
- Neme, K., Nafady, A., Uddin, S., & Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. *Heliyon*, *7*(12), e08539. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K.-H., & Chakrabarty, I. (2022). Nanofertilizers: A Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture. *Plants*, *11*(19), 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- Norizan, M. N., Moklis, M. H., Ngah Demon, S. Z., Halim, N. A., Samsuri, A., Mohamad, I. S., Knight, V. F., & Abdullah, N. (2020). Carbon nanotubes: functionalisation and their application in chemical sensors. *RSC Advances*, *10*(71), 43704–43732. <https://doi.org/10.1039/D0RA09438B>
- Palaniyandi, T., B, K., Prabhakaran, P., Viswanathan, S., Rahaman Abdul Wahab, M., Natarajan, S., Kumar Kaliya Moorthy, S., & Kumarasamy, S. (2023). Nanosensors for the diagnosis and therapy of neurodegenerative disorders and inflammatory bowel disease. *Acta Histochemica*, *125*(2), 151997. <https://doi.org/10.1016/j.acthis.2023.151997>
- Pino V., E., Montalván D., I., Vera M., A., & Ramos F, L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo

- de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 37(4), 55–64. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>
- Potadar, R. S., Moholkar, D. N., & Pawar, K. D. (2022). Nanosensors for the detection of heavy trace metals in soil. In *Nanosensors for Smart Agriculture* (pp. 329–353). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824554-5.00001-X>
- Rodriguez-Yzquierdo, G. A., Patiño-Moscoso, M. A., & Betancourt-Vásquez, M. (2021). Caracterización fisiológica en plantas de Cannabis medicinal durante distintas etapas fenológicas bajo estrés biótico. *Agronomía Mesoamericana*, 823–840. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.44443>
- Sarmanova, O. E., Laptinskiy, K. A., Khmeleva, M. Yu., Burikov, S. A., Dolenko, S. A., Tomskaya, A. E., & Dolenko, T. A. (2021). Development of the fluorescent carbon nanosensor for pH and temperature of liquid media with artificial neural networks. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 258, 119861. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119861>
- SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks). (2007). *the existing and proposed definitions relating to products of nanotechnologies*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ec.europa.eu/health/archive/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_012.pdf
- Serag, M. F., Kaji, N., Gaillard, C., Okamoto, Y., Terasaka, K., Jabasini, M., Tokeshi, M., Mizukami, H., Bianco, A., & Baba, Y. (2011). Trafficking and Subcellular Localization of Multiwalled Carbon Nanotubes in Plant Cells. *ACS Nano*, 5(1), 493–499. <https://doi.org/10.1021/nn102344t>
- Sharma, A., Ranjit, R., Pratibha, Kumar, N., Kumar, M., & Giri, B. S. (2023). Nanoparticles based nanosensors: Principles and their applications in active packaging for food quality and safety detection. *Biochemical Engineering Journal*, 193, 108861. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108861>
- Song, K., Cho, N.-K., Park, K., & Kim, C.-S. (2022). Investigating Mechanical Behaviours of PDMS Films under Cyclic Loading. *Polymers*, 14(12), 2373. <https://doi.org/10.3390/polym14122373>
- Sorcía-Morales, M., Gómez-Merino, F. C., Sánchez-Segura, L., Spinoso-Castillo, J. L., & Bello-Bello, J. J. (2021). Multi-Walled Carbon Nanotubes Improved Development during In Vitro Multiplication of Sugarcane (*Saccharum spp.*) in a Semi-Automated Bioreactor. *Plants*, 10(10), 2015. <https://doi.org/10.3390/plants10102015>
- Swierczewska, M., Liu, G., Lee, S., & Chen, X. (2012). High-sensitivity nanosensors for biomarker detection. *Chem. Soc. Rev.*, 41(7), 2641–2655. <https://doi.org/10.1039/C1CS15238F>
- Tang, W., Yan, T., Wang, F., Yang, J., Wu, J., Wang, J., Yue, T., & Li, Z. (2019). Rapid fabrication of wearable carbon nanotube/graphite strain sensor for real-time monitoring of plant growth. *Carbon*, 147, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.03.002>
- Wei, J., Wang, R., Pan, F., & Fu, Z. (2022). Polyvinyl Alcohol/Graphene Oxide Conductive Hydrogels via the Synergy of Freezing and Salting Out for Strain Sensors. *Sensors*, 22(8), 3015. <https://doi.org/10.3390/s22083015>

- Wu, Z., Ding, Q., Li, Z., Zhou, Z., Luo, L., Tao, K., Xie, X., & Wu, J. (2022). Ultrasensitive, stretchable, and transparent humidity sensor based on ion-conductive double-network hydrogel thin films. *Science China Materials*, *65*(9), 2540–2552. <https://doi.org/10.1007/s40843-021-2022-1>
- Yang, J., Ye, Y., Li, X., Lü, X., & Chen, R. (2018). Flexible, conductive, and highly pressure-sensitive graphene-polyimide foam for pressure sensor application. *Composites Science and Technology*, *164*, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.044>
- Yu, T., Lü, X., & Bao, W. (2023). High electrical self-healing flexible strain sensor based on MWCNT-polydimethylsiloxane elastomer with high gauge factor and wide measurement range. *Composites Science and Technology*, *238*, 110049. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110049>
- Zhang, P., Chen, Y., Li, Y., Zhang, Y., Zhang, J., & Huang, L. (2020). A Flexible Strain Sensor Based on the Porous Structure of a Carbon Black/Carbon Nanotube Conducting Network for Human Motion Detection. *Sensors*, *20*(4), 1154. <https://doi.org/10.3390/s20041154>
- Zhang, Q., Ying, Y., & Ping, J. (2022). Recent Advances in Plant Nanoscience. *Advanced Science*, *9*(2), 2103414. <https://doi.org/10.1002/adv.202103414>
- Zhang, R., Zhao, W., Ning, F., Zhen, J., Qiang, H., Zhang, Y., Liu, F., & Jia, Z. (2022). Alginate Fiber-Enhanced Poly(vinyl alcohol) Hydrogels with Superior Lubricating Property and Biocompatibility. *Polymers*, *14*(19), 4063. <https://doi.org/10.3390/polym14194063>
- Zhu, L., Chen, L., Gu, J., Ma, H., & Wu, H. (2022). Carbon-Based Nanomaterials for Sustainable Agriculture: Their Application as Light Converters, Nanosensors, and Delivery Tools. *Plants*, *11*(4), 511. <https://doi.org/10.3390/plants11040511>

Apéndice A

Nomenclatura

SWCNTs (Single Wall Carbon Nanotubes/ Nanotubos de Carbono de Pared Simple)

MWCNTs (Multiple Wall Carbon Nanotubes/ Nanotubos de Carbono de Pared Multiple)

CNT (Carbon Nanotubes / Nanotubos de Carbono)

NT (Nanotecnología)

CNM (Carbon Nanomaterials / Nanomateriales a base de carbono)

CD (Carbon Dots/ Puntos de Carbono)

GRA (Grafeno)

GO (Graphene Oxide /Oxido de Grafeno)

CNH (Nanocuernos)

CNF (Carbon Nanofibers/Nanofibras de Carbono)

MEMS (Micromachined microelectromechanical systems/ Sistemas microelectromecánicos micromecanizados.)

Nm (nanómetros)

Ag (Plata)

Cu (Cobre)

ZnO (Óxido de zinc)

PDMS (Polidimetilsiloxano)

PVA (Alcohol Polivinílico)

NaCl (Cloruro de Sodio)

GO (Oxido de Grafito)

CO₂ (Dióxido de carbono)

O₂ (Oxígeno)

SDS (Dodecilsulfato de Sodio)

DBSS (Dodecil Bencen Sulfonato de Sodio)

SC (Sodio Colato)

CTAB (Bromuro de Cetiltrimetilamonio)

PVAc (Acetato de Polivinilo)

Información de soporte

	Películas resistivas a base de SWCNTs	Hidrogeles a base de SWCNTs	Composito a Base de SWCNTs	PDMS-SWCNTs
Materiales	Resina de silicio. Dispersión de nanotubos de carbono al 66.66% de concentración.	Hidrogel con concentración de PVA al 4%. Bórax concentrado al 2.4 %. Dispersión de nanotubos de carbono al 66.66% de concentración.	Mezcla de PVA y PVAc. Dispersión de nanotubos de carbono al 66.66% de concentración. Grafito en polvo.	PDMS. Dispersión de nanotubos de carbono al 66.66% de concentración.
Resistencia en KΩ	3.76	11.88	26	3.08
Tiempo de elaboración	6 horas 8 horas 12 horas Dependiendo de la dispersión	13 horas	24 horas	12 horas
Costo por sensor	\$.80	\$1.83	\$1.52	\$0.75
Observaciones	Demasiado rígidas para ser sometidas a deformación, mala adherencia a superficies	Buena deformación, pero su tiempo de exposición al aire hace que el material se endurezca y pierda flexibilidad, buena adherencia a las superficies	Buena deformación, el material resiste al ambiente, si se humedece el sensor con etanol la capa de PVAc se vuelve blanda y puede haber rupturas. Buena adherencia superficies	Buena deformación, el material resiste al ambiente, adherencia a las superficies en prueba.

Estimaciones de costos

Material	Cantidad	Precio \$
SWCNTs	250 gr	17,077
PVA	1 kg	280
PVAc	100 ml	18
PDMS	1 L	5800
Agua destilada	20 L	250
Tritón X-100	1 L	1041.81
DBSS	1 kg	135
Resina de silicio	250 ml	65
Bórax	250 gr	25
Grafito	1 kg	338

Costo de elaboración de la dispersión

Material	Cantidad	Costo \$
Triton x-100	15 ml	15.63
SWCNTs	10 mg	0.00068
Total		\$15.64

Elaboración de películas en resina de silicio

Material	Cantidad	Costo \$
Resina de silicio	10 ml	0.36
Dispersión de SWCNTs	5 ml	5.21
Total		\$5.57
Numero de películas que se obtienen por este método	7	\$0.80

Elaboración de Hidrogel resistivo

Material	Cantidad	Costo \$
Dispersión SWCNTs	10 ml	10.42
Agua destilada	200 ml	2.50
PVA	8 gr	2.24
Solución de bórax	1 ml	2.50
Grafito	2 mg	0.676
Total		\$18.34
Numero de películas que se obtienen por este método	10	\$1.83

Elaboración de Composito

Material	Cantidad	Costo \$
Dispersión de SWCNTs	10 ml	10.42
PVA	947.2 mg	0.2652
Agua destilada	50 ml	0.625
PVAc	21 ml	3.6
Grafito	183.4 mg	0.061
Total		\$15.15
Numero de películas que se obtienen por este método	10	\$1.52

Hoja de datos preliminar

Nanosensor de Deformación para Morfología en Plantas

Fabricante: Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango

Dimensiones Físicas: 5 cm x 2 cm (forma de zigzag)

Material: Compuesto de carbono y polímeros flexibles.

Tipo de Deformación Medida: Elongación de tallos y ramas.

Montaje: Fijado mediante etanol para ablandar la capa protectora del nanomaterial y permitir una integración no invasiva en las plantas.

Frecuencia de Muestreo: 3 milisegundos.

Rango de resistencia estándar: 190-250 K Ω

Suministro: 5V - 9V

Interfaz de Adquisición de Datos: Puerto serial de Arduino.

Software de Análisis de Datos: Conexión entre Arduino y Python para animación en tiempo real y guardado de datos.

Impacto en el Crecimiento de la Planta: No se ha observado ningún efecto adverso en el crecimiento de las plantas.

Comunicación Inalámbrica: Actualmente no está disponible, pero se está considerando para futuras versiones.

Calibración: Se recomienda dejar secar el etanol durante aproximadamente una hora antes de la medición para evitar afectar la resistencia del sensor.

Compatibilidad Ambiental: Resistente a condiciones ambientales típicas de cultivos agrícolas.

Apéndice B

Publicación de artículo



ENFOQUES MULTIDISCIPLINARIOS DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y AGROINDUSTRIAL EN LOS CIRCUITOS DE PRODUCCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO

COORDINADORES

EDUARDO GAMERO INDA, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, RUBÉN GUERRERO RIVERA, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, GRACE ERANDY BÁEZ HERNÁNDEZ, GREGORIO POLLORENA LÓPEZ, ADALID GRACIANO OBESO, VIRIDIANA HUMARÁN SARMIENTO, JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ ALVAREZ, DARÍO CISNEROS ARREOLA, MANUEL ISMAEL MATA ESCOBEDO, EDGAR GUSTAVO LÓPEZ SAUT, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, LILIA ANTONIETA SALAZAR CADENGO.

ISBN: 978-607-59655-4-3



9 786075 965543



Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Durango



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



ENFOQUES MULTIDISCIPLINARIOS DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y AGROINDUSTRIAL EN LOS CIRCUITOS DE PRODUCCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO

COORDINADORES

EDUARDO GAMERO INDA, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, RUBÉN GUERRERO RIVERA, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, GRACE ERANDY BÁEZ HERNÁNDEZ, GREGORIO POLLORENA LÓPEZ, ADALID GRACIANO OBESO, VIRIDIANA HUMARÁN SARMIENTO, JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, DARÍO CISNEROS ARREOLA, MANUEL ISMAEL MATA ESCOBEDO, EDGAR GUSTAVO LÓPEZ SAUT, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, LILIA ANTONIETA SALAZAR CADENGO

AUTORES

ALBERTO BRAVO ALCARAZ, ALICIA RODRÍGUEZ PULIDO, ANA MARÍA BAILÓN SALAS, ÁNGEL ITZCÓATL HUIZAR BRETADO, AURELIO CASTILLO LIÑÁN, CHRISTIAN RÍOS CHAVARRÍA, DARÍO CISNEROS ARREOLA, DAVID ORLANDO ROMERO SOTO, EDILBERTO ESCALERA GALVÁN, EDUARDO GAMERO INDA, FELIX ACOSTA HERNÁNDEZ, FRANCISCO ESTRADA GARCÍA, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, ISAAC OMAR REYES LARA, IVÁN GONZÁLEZ LAZALDE, JESÚS ADRIÁN RODRÍGUEZ GURROLA, JESÚS ANTONIO FLORES SOTO, JESÚS AURELIO MELÉNDREZ ROJAS, JESÚS EBER GUTIÉRREZ LÓPEZ, JESÚS EMMANUEL MORENO ROCHA, JOSÉ ALBERTO GÓMEZ ELIZALDE, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, JUAN CARLOS VELÁZQUEZ CHÁVEZ, JUAN HÉCTOR ALZATE ESPINOZA, JUAN MANUEL HIDALGO MARTÍNEZ, JULIO CÉSAR ÁLVAREZ CHARQUEÑO, KARINA MONTSERRAT PARDO RICALDAY, LILIAN GISEL CONTRERAS MORALES, LUIS ALBERTO ORDAZ DÍAZ, MANUEL ISMAEL MATA ESCOBEDO, MARCO ANTONIO DE LA CRUZ GONZÁLEZ, MARÍA DEL ROSARIO MONCAYO LUJÁN, MARÍA QUETZALCHIHUATL GALVÁN ISMAEL, MARIBEL MADRID DEL PALACIO, MAURICIO BOTELLO ORTÍZ, MAYELA DEL RAYO LECHUGA NEVÁREZ, MERIT CISNEROS GONZÁLEZ, MIGUEL JAIME DÍAZ CAMPILLO, NOEL AGUIRRE CHÁVEZ, NORMA ALICIA GARCÍA VIDAÑA, OMAR ANTONIO GÓMEZ ARREOLA, OMAR FABIAN RIVERA CENICEROS, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, PATRICIA AYALA VERDÍN, RAÚL ANTONIO ALVARADO ARROYO, RAÚL LOREDO MEDINA, RAÚL MORALES RODRÍGUEZ, REBECA GUERRERO RODRÍGUEZ, RENÉE LILIBETH YÉPEZ MARTÍNEZ, ROBERTO IVÁN HERRERA CUMPLIDO, RUBÉN GUERRERO RIVERA, YOLOCUAUHTLI SALAZAR MUÑOZ



Xalapa, Veracruz. México a 25 de mayo de 2023

DICTAMEN EDITORIAL

La presente obra fue arbitrada y dictaminada en dos procesos; el primero, fue realizado por el COMITÉ EDITORIAL RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. con sede en México; que sometió a los capítulos incluidos en la obra a un proceso de dictaminación a doble ciego para constatar de forma exhaustiva la temática, pertinencia y calidad de los textos en relación a los fines y criterios académicos de la misma, cumpliendo así con la primera etapa del proceso editorial. El segundo proceso de dictaminación estuvo a cargo del COMITÉ CIENTÍFICO RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. Y EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO; donde se seleccionaron expertos en el tema para la evaluación de los capítulos de la obra y se procedió con el sistema de dictaminación a doble ciego. Cabe señalar que previo al envío a los dictaminadores, todo trabajo fue sometido a una prueba de detección de plagio. Una vez concluido el arbitraje de forma ética y responsable y por acuerdo del Comité Editorial y Científico, se dictamina que la obra **"Enfoques multidisciplinares de la innovación tecnológica y agroindustrial en los circuitos de producción, distribución y consumo"** cumple con la relevancia y originalidad temática, la contribución teórica y aportación científica, rigurosidad y calidad metodológica, actualidad de las fuentes que emplea, redacción, ortografía y calidad expositiva.

Dr. Daniel Armando Olivera Gómez
Director Editorial

Sello Editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (978-607-59655)

Dublín 34, Residencial Monte Magno
C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.
Cel 2282386072



ISBN: 978-607-59655-4-3



Xalapa, Veracruz. México a 05 de junio de 2023

CERTIFICACIÓN EDITORIAL

RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI) con sello editorial N° 978-607-59655 otorgado por la Agencia Mexicana de ISBN, hace constar que el libro "Enfoques multidisciplinares de la innovación tecnológica y agroindustrial en los circuitos de producción, distribución y consumo" registrado con el ISBN 978-607-59655-4-3 fue publicado por nuestro sello editorial con fecha de aparición del 5 de junio de 2023 cumpliendo con todos los requisitos de calidad científica y normalización que exige nuestra política editorial.

Fue evaluado por pares académicos externos y aprobado los Comités Editorial y Científico de la RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. y del INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO.

Todos los soportes concernientes a los procesos editoriales y de evaluación se encuentran bajo el poder y disponibles en Editorial RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI), los cuales están a disposición de la comunidad académica interna y externa en el momento que se requieran. La normativa editorial y repositorio se encuentran disponibles en la página <http://www.redibai-myd.org>

Doy fe.

Dr. Daniel Armando Olivera Gómez
Director Editorial

Sello Editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (978-607-59655)

Dublín 34, Residencial Monte Magno
C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.
Cel 2282386072



**ENFOQUES MULTIDISCIPLINARIOS DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y AGROINDUSTRIAL
EN LOS CIRCUITOS DE PRODUCCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO**

COORDINADORES

EDUARDO GAMERO INDA, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, RUBÉN GUERRERO RIVERA, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, GRACE ERANDY BÁEZ HERNÁNDEZ, GREGORIO POLLORENA LÓPEZ, ADALID GRACIANO OBESO, VIRIDIANA HUMARÁN SARMIENTO, JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, DARÍO CISNEROS ARREOLA, MANUEL ISMAEL MATA ESCOBEDO, EDGAR GUSTAVO LÓPEZ SAUT, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, LILIA ANTONIETA SALAZAR CADENGO

AUTORES

ALBERTO BRAVO ALCARAZ, ALICIA RODRÍGUEZ PULIDO, ANA MARÍA BAILÓN SALAS, ÁNGEL ITZCOÁTIL HUIZAR BRETADO, AURELIO CASTILLO LIÑÁN, CHRISTIAN RÍOS CHAVARRÍA, DARÍO CISNEROS ARREOLA, DAVID ORLANDO ROMERO SOTO, EDILBERTO ESCALERA GALVÁN, EDUARDO GAMERO INDA, FELIX ACOSTA HERNÁNDEZ, FRANCISCO ESTRADA GARCÍA, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, ISAAC OMAR REYES LARA, IVÁN GONZÁLEZ LAZALDE, JESÚS ADRIÁN RODRÍGUEZ GURROLA, JESÚS ANTONIO FLORES SOTO, JESÚS AURELIO MELÉNDREZ ROJAS, JESÚS EBER GUTIÉRREZ LÓPEZ, JESÚS EMMANUEL MORENO ROCHA, JOSÉ ALBERTO GÓMEZ ELIZALDE, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, JUAN CARLOS VELÁZQUEZ CHÁVEZ, JUAN HÉCTOR ALZATE ESPINOZA, JUAN MANUEL HIDALGO MARTÍNEZ, JULIO CÉSAR ÁLVAREZ CHARQUEÑO, KARINA MONTSERRAT PARDO RICALDAY, LILIAN GISEL CONTRERAS MORALES, LUIS ALBERTO ORDAZ DÍAZ, MANUEL ISMAEL MATA ESCOBEDO, MARCO ANTONIO DE LA CRUZ GONZÁLEZ, MARÍA DEL ROSARIO MONCAYO LUJÁN, MARÍA QUETZALCIHUATL GALVÁN ISMAEL, MARIBEL MADRID DEL PALACIO, MAURICIO BOTELLO ORTÍZ, MAYELA DEL RAYO LECHUGA NEVÁREZ, MERIT CISNEROS GONZÁLEZ, MIGUEL JAIME DÍAZ CAMPILLO, NOEL AGUIRRE CHÁVEZ, NORMA ALICIA GARCÍA VIDAÑA, OMAR ANTONIO GÓMEZ ARREOLA, OMAR FABIAN RIVERA CENICEROS, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, PATRICIA AYALA VERDÍN, RAÚL ANTONIO ALVARADO ARROYO, RAÚL LOREDO MEDINA, RAÚL MORALES RODRÍGUEZ, REBECA GUERRERO RODRÍGUEZ, RENÉE LILIBETH YÉPEZ MARTÍNEZ, ROBERTO IVÁN HERRERA CUMPLIDO, RUBÉN GUERRERO RIVERA, YOLOCUAUHTLI SALAZAR MUÑOZ

EDITORIAL

©RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. 2023



EDITA: RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C.
DUBLÍN 34, FRACCIONAMIENTO MONTE MAGNO
C.P. 91190. XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO.
CEL 2282386072
www.redibai.org
redibai@hotmail.com

ISBN: 978-607-59655-4-3



Sello editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (978-607-59655)
Primera Edición, Xalapa, Veracruz, México.
No. de ejemplares: 2
Presentación en medio electrónico digital
Formato PDF 15 MB
Fecha de aparición 05/06/2023
ISBN 978-607-59655-4-3

PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ÁREA DE CAPACITACIÓN PARA LA EMPRESA CSC CAPACITACIONMEXICO

LILIAN GISEL CONTRERAS MORALES
121

EVALUACIÓN TERMODINÁMICA PARA UN SISTEMA DE CONSERVACIÓN DE PAJILLAS CON SEMEN DE GANADO BOVINO

ROBERTO IVÁN HERRERA CUMPLIDO, EDILBERTO ESCALERA GALVÁN, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
140

DETECCIÓN DE ESPERMATOZOIDES DE GANADO VACUNO, POR MEDIO DE MÉTODOS CLÁSICOS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

ÁNGEL ITZCÓATL HUIZAR BRETADO, RUBÉN GUERRERO RIVERA, NORMA ALICIA GARCÍA VIDAÑA, EDUARDO GAMERO INDA
157

DESARROLLO DE UNA MÁQUINA TOSTADORA DE SEMILLAS EN PROCESO CONTINUO: EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE GAS LP

FRANCISCO ESTRADA MARTÍNEZ, MAURICIO BOTELLO ORTÍZ, FRANCISCO JAVIER GUERRERO HARO
169

RED MÓVIL DE MONITOREO CLIMÁTICO BASADA EN ARDUINO

CHRISTIAN RÍOS CHAVARRÍA, FELIX ACOSTA HERNÁNDEZ, OMAR FABIAN RIVERA CENICEROS
183

NANOSENSOR DE DEFORMACIÓN PARA EL MONITOREO DEL CRECIMIENTO EN PLANTAS

JOSÉ ALBERTO GOMEZ ELIZALDE, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, JOSUÉ ORTIZ MEDINA
195

INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN SECADOR SOLAR DIRECTO CON CONVECCIÓN FORZADA

JESUS ADRIAN RODRIGUEZ GURROLA, AURELIO CASTILLO LIÑÁN, YOLOCUAUHTLI SALAZAR MUÑOZ
212

ANÁLISIS CRONOLÓGICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CEBOLLA MEDIANTE IMÁGENES PARA DETERMINAR LA MADUREZ FISIOLÓGICA

PATRICIA AYALA VERDÍN, RUBÉN GUERRERO RIVERA, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, AURELIO CATILLO LIÑÁN
227

INSTRUMENTACIÓN DE UN DESTILADOR PARA LA TRATA DE RESIDUOS DE BAGAZO DE MEZCAL PARA GENERAR BIOCOMBUSTIBLES COMO MANERA DE COMBATIR LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS

OMAR FABIÁN RIVERA CENICEROS, JUAN MANUEL HIDALGO MARTÍNEZ, LUIS ALBERTO ORDAZ DÍAZ
239

NANOSENSOR DE DEFORMACIÓN PARA EL MONITOREO DEL CRECIMIENTO EN PLANTAS

JOSÉ ALBERTO GOMEZ ELIZALDE¹, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA², JOSUÉ ORTIZ MEDINA³

RESUMEN

Los nanosensores son dispositivos compuestos de materiales con estructuras en escala nanométrica, los cuales pueden utilizarse para la detección de moléculas, partículas, campos eléctricos y térmicos entre otra amplia variedad de aplicaciones. Estos dispositivos tienen diferentes áreas de aplicación como lo son la electrónica, la informática, la energía y la medicina, en donde son utilizados para la detección de diversas sustancias y cambios en propiedades físicas. En este trabajo se elaboraron nanosensores a partir de películas delgadas y nanocompuestos flexibles, a base de dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple. Estos nanosensores muestran una buena conductividad eléctrica, relacionada con las características de la dispersión del nanomaterial en términos de concentración y del tipo de dispersante. El nanosensor desarrollado fue puesto a prueba aplicando deformaciones mecánicas en modelos de plantas, a fin de obtener una relación entre la deformación y el cambio en la conductividad eléctrica. Por medio de la instrumentación electrónica adecuada, se pudieron determinar cambios morfológicos en plantas, medibles en términos de magnitud y tiempo. La propuesta de nanosensor desarrollada en este trabajo tiene usos prometedores en el área agroindustrial con flexibilidad en el ajuste de sus propiedades, lo cual ayudaría a contribuir a un mejor estudio del crecimiento y otros cambios morfológicos y fisiológicos en plantas de los cultivos en las de las diferentes partes de nuestro estado y nuestro país.

Palabras clave: nanotecnología, nanosensor, aplicaciones agroindustriales, nanoelectrónica.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. 16041278@itdurango.edu.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. fgodinez@itdurango.edu.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. j.ortiz@itdurango.edu.mx

ABSTRACT

Nanosensors are devices composed of materials with nanoscale structures, which can be used for the detection of molecules, particles, electric and thermal fields, among others in a wide variety of applications. These devices find applications in a wide range of areas, such as electronics, computer science, energy, and medicine, where they are used for the detection of various substances and changes in their physical properties. In this work, nanosensors were developed from thin films and flexible nanocomposites, based on dispersions of single-walled carbon nanotubes. These nanosensors show good electrical conductivity, related to the characteristics of the dispersion of the nanomaterial in terms of concentration and the type of dispersant. The developed nanosensor was evaluated by applying mechanical deformations in plant models, to obtain a relationship between morphological deformation and changes in electrical conductivity. By means of the appropriate electronic instrumentation, morphological changes in plants, measurable in terms of magnitude and time, could be determined. The nanosensor proposal developed in this work has promising uses in the agro-industrial area where it can be modified to adjust its properties and improve its functionality towards, better devices designed to study the growth and other morphological and physiological changes in crop plants in various parts of our state and our country.

Keywords: nanotechnology, nanosensor, agro-industrial applications, nanoelectronics

INTRODUCCIÓN

La agricultura, la cría y explotación de animales, el aprovechamiento forestal, la pesca y la caza son las principales actividades económicas en el estado de Durango, aportando un 9.6% del PIB 2020 y un 3.1% en 2021 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022). El cultivo de semillas oleaginosas, leguminosas y cereales en particular, es una actividad estratégica para el desarrollo rural del estado, ya que tiene un impacto social y económico significativo en la ocupación, autoempleo y generación de empleos en las áreas rurales y periféricas de las concentraciones poblacionales. Sin embargo, dados los retos actuales relacionados

con los cambios en los patrones climáticos, la falta de agua, y de contaminación y degradación de suelos, la sustentabilidad de dichos cultivos y otras actividades agrícolas se ven sujetas a diferentes tipos de dificultades. La tecnificación de métodos de producción agrícolas pueden ser una alternativa para incrementar la rentabilidad y resiliencia del sector agrícola, tal y como se ha observado en otras regiones del país y del mundo. Dentro de estas alternativas de tecnificación, se han propuesto por ejemplo nuevas técnicas de riego inteligente (García et al., 2020), de liberación controlada de agroquímicos (Nongbet et al., 2022), etc., los cuales contribuyen a un mejor aprovechamiento de recursos. Sin embargo, para una implementación exitosa de estas técnicas, es necesario contar con medios novedosos de monitoreo fisiológico de cultivos, que permitan tener información detallada de la salud de las plantas, a fin de poder determinar de manera automatizada las tasas requeridas de riego y de fertilización.

El objetivo del presente proyecto es desarrollar un modelo de nanosensores novedosos, delgados y flexibles, a base de nanomateriales, para su aplicación en necesidades agroindustriales, que aseguren el cuidado adecuado de los cultivos, al llevar a cabo el monitoreo de las variables morfológicas y fisiológicas. En principio, el sensor se caracterizará para medir el crecimiento en las plantas, ya que actualmente, el proceso más utilizado para monitorear el crecimiento de las plantas es la observación externa de las plántulas. Sin embargo, este proceso tiene varias desventajas, como por ejemplo baja precisión en la medición (Q. Zhang et al., 2022). Existe por tanto la necesidad de desarrollar un sensor que ayude a monitorear el crecimiento de las plantas de manera más precisa y eficiente. El uso de sensores a base de nanomateriales permitirá un monitoreo más preciso y menos invasivo de las variables fisiológicas y morfológicas de las plantas en comparación con los métodos tradicionales, disminuyendo los daños a las plantas de prueba y, por lo tanto, posibles alteraciones en sus parámetros fisiológicos ocasionados al mismo estrés de la prueba. Posteriormente se podrán modificar los sensores para monitorear diferentes variables en las plantas, ya que además del monitoreo en tiempo real de la planta para lograr una mejor producción agrícola, también se debe

prestar atención al suministro de nutrientes y al manejo de plagas durante el crecimiento de la planta (Q. Zhang et al., 2022).

Los sensores a base de nanomateriales constituyen una nueva plataforma para monitorear el crecimiento y desarrollo de las plantas, no destructiva y precisa, que puede aplicarse a plantas individuales (Liu et al., 2021). Estos nanosensores se han utilizado ya para la detección de oxígeno molecular, trifosfato de adenosina, iones de calcio, especies reactivas de oxígeno, óxido nítrico, hormonas vegetales, patógenos vegetales, determinación de maduración de frutos y gestión de fertilizantes y plaguicidas (Shaw & Honeychurch, 2022). Según su construcción, los nanomateriales se clasifican actualmente como: a base de carbono, compuestos, dendrímeros y a base de metal (Saleem & Zaidi, 2020), entre otros. Los nanomateriales basados en carbono han sido utilizados cada vez más en el diseño de sensores y biosensores (Morais, 2021). Dentro de la familia de nanoestructuras del carbono podemos encontrar los nanotubos (CNT), nanocables, nanocristales, fullerenos y nanocompuestos los cuales dependiendo de su forma de fabricación y la estructura muestran propiedades particulares a cada material. Por ejemplo, cuando se combinan nanopartículas metálicas con estas nanoestructuras de carbono los materiales resultantes muestran propiedades tales, como resistencia mecánica, propiedades ópticas mejoradas, potencial antimicrobiano, y características de conducción eléctricas sobresalientes (Neme et al., 2021). Otras propiedades deseables son una, alta relación superficie-volumen, lo que permite detecciones altamente sensibles en escalas nano, femto, atto y zepto (Arndt et al., 2020), donde las nanopartículas actúan como generadoras o detectoras de una señal, aumentando la sensibilidad (Swierczewska et al., 2012). Otro ejemplo de aplicaciones de sensores a base de nanomateriales de carbono puede ser su uso en la medición de humedad en las plantas, esto porque los sensores que se basan en CNT son muy sensibles a variaciones en las energías de unión y activación con las moléculas de agua circundantes (Li et al., 2017). Otro ejemplo del uso de nanomateriales en áreas agrícolas sería la detección de niveles de potasio en el suelo, utilizando nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs) modificados con óxido de zinc y valinomicina. Dispositivos hechos a base de estos fueron usados

para mediciones estables y altamente sensibles ante la presencia de potasio en el suelo (Kumar Khanna, 2021). Finalmente, pueden mencionarse algunos dispositivos sensores de resistencia mecánica o de deformación, en donde los rellenos de carbono conductivo y los nanocables metálicos se puede combinar con sustratos flexibles (como polidimetilsiloxano (PDMS), poliuretano (PU), caucho de silicona (SR), telas elásticas, bandas elásticas, entre otros materiales), y son utilizados para fabricar sensores piezorresistivos flexibles con una alta sensibilidad y un amplio rango de estiramiento mediante un determinado método de preparación (P. Zhang et al., 2020).

Ya que el carbono es uno de los elementos más comunes que existen en la naturaleza, y que es la base para varios tipos de nanomateriales relevantes, (Serag et al., 2011; Zhu et al., 2022), este trabajo se basa en una aplicación de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs por sus siglas en inglés), los cuales son básicamente cilindros de carbono grafitico que poseen propiedades eléctricas y mecánicas únicas. El nanosensor desarrollado puede integrarse directamente en la superficie de la planta. Con el crecimiento de la planta, el sensor experimenta deformaciones mínimas lo que provoca una pequeña expansión de este y, como consecuencia, cambios en las señales eléctricas de salida. Estos cambios son procesados por medio de una interfaz electrónica diseñada específicamente para el nanosensor, e implementa una metodología para el procesamiento de los datos. Además, se busca que el diseño del nanosensor permita una operación menos invasiva que los métodos tradicionales, lo que reduciría los daños a las plantas de prueba y posibles alteraciones en sus parámetros fisiológicos debido al estrés de la prueba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron diferentes procesos para optimizar el desarrollo de un dispositivo de sensado a base de SWCNTs aprovechando sus propiedades electrónicas y mecánicas, para el monitoreo del crecimiento en plantas, el cual consto de los siguientes procesos:

Dispersiones

Se elaboraron dispersiones de 6.8 mg de SWCNTs (pureza 99.8%, Sigma Aldrich) mezclados en 15 ml de Triton X-100 (solución surfactante al 1% en agua, Hycel reactivos químicos) mediante una agitación constante a 3000 rpm en un homogeneizador FSH-2A durante diferentes periodos de tiempo: 3, 6 y 10 horas (ver esquema en Figura 1a). De esta manera, se obtuvieron muestras como la mostrada en la Figura 1b, con diferentes niveles de dispersión lo cual permitió evaluar las propiedades de los nanotubos en función del tiempo de agitación.

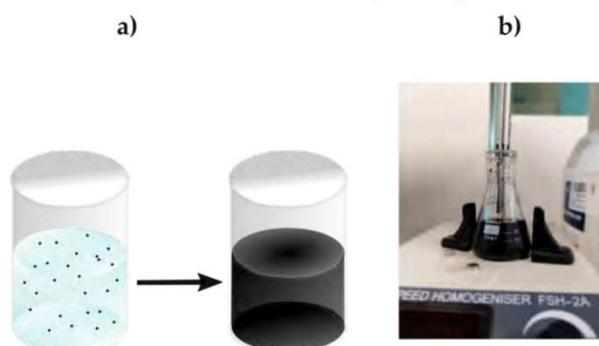


Figura 1.- Preparación de las dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple, **a)** Esquemático de la preparación de dispersiones, **b)** Preparación de la dispersión de nanotubos de carbono sobre homogeneizador.

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas de conductividad

Para evaluar la conductividad de las dispersiones, se aplicaron sobre sustratos de resina de silicio las diferentes muestras de dispersiones obtenidas con ayuda de un aerógrafo (mkz-Aerogminigri, Gutsark), tal como se muestra en la figura 2. Posteriormente, las películas obtenidas (ver Figura 3a), se cortaron en películas más pequeñas como se muestra en la figura 3b, con dimensiones de 2x4 cm. Con ayuda de una fuente de voltaje (HM-305, Havimatek) se sometieron a una tensión de 5 volts para registrar la corriente que circulaba a través de ellas (ver Figura 3c) y, así calcular su resistencia por medio de la ley de Ohm. Este método permitió obtener información precisa sobre las propiedades eléctricas de las dispersiones de

nanotubos de carbono de pared simple mezclados en Triton X-100, en función del tiempo de agitación.



Figura 2.- Rocío de las dispersiones sobre sustratos a base de resina de silicio.

Fuente: Elaboración propia.

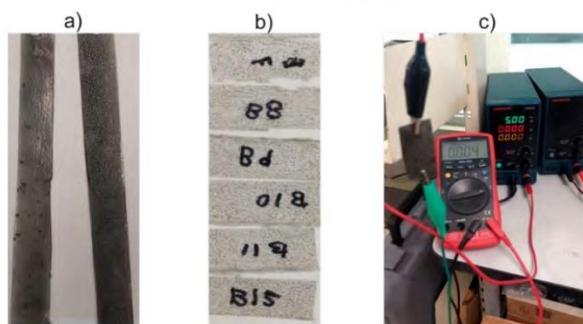


Figura 3.- a) películas resistivas a base de resina de silicio obtenidas después de rociar la dispersión, b) películas resistivas de 2x4 cm para evaluar conductividad, c) medición de conductividad eléctrica sobre película.

Fuente: Elaboración propia

Preparación del compuesto para creación del sensor

Durante la elaboración de la dispersión SWCNTs, sobre un agitador magnético (S18525, Thermolyne) se preparó una mezcla de 50 ml de agua destilada (CTR SCIENTIFIC) a la que se añadieron 947.2 mg de alcohol polivinílico (PVA, REAXSOL). Una vez que el PVA se disolvió por completo, se agregaron 20 ml de acetato de polivinilo (PVAc), un adhesivo comercial de PVA, y se dejó mezclar durante 1 hora. Posteriormente, se añadieron 183.4 mg de grafito en polvo y 10 ml de la dispersión de nanotubos de carbono.



Figura 4.- Compósito elaborado a base de las dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple.

Fuente: Elaboración propia

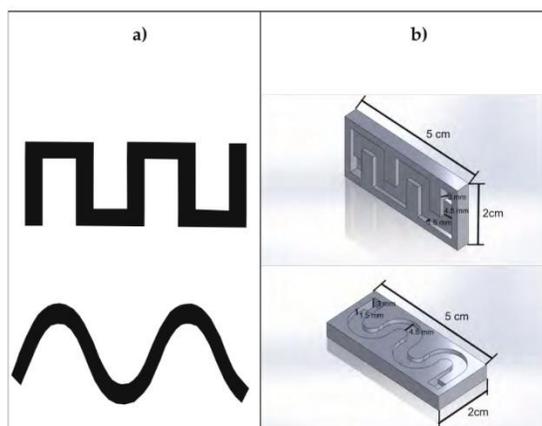


Figura 5.- a) propuesta de diseño para forma del sensor, b) prototipos diseñados en base a la propuesta para la forma del sensor la profundidad del molde es de 1.5 mm, en los extremos la profundidad es de 3 mm para la colocación de los electrodos, el ancho del sensor es de 4.5 mm, el largo y ancho de la placa es de 2x5 cm.

Fuente: Elaboración propia

Elaboración del sensor y colocación sobre planta de muestra

Para la fabricación del sensor se utilizaron los moldes que se muestran en la Figura 5. Se colocó una pequeña cantidad de PVAc como base sobre la cual se depositó, por medio de una jeringa, una cantidad determinada de composito (ver Figura 4), que se extendió naturalmente en forma de película delgada. Una vez colocada la primera capa del sensor, se insertaron los cables que sirvieron como electrodos para conectar el sensor al circuito. Durante este proceso, fue necesario esperar a que se secase la mezcla previamente colocada antes de agregar una nueva capa del composito. En total, se requirieron 10 capas para completar la fabricación del sensor. Una vez seca la última capa de la mezcla, se añadió otra pequeña cantidad de PVAc para proteger el sensor.

El sensor elaborado figura 6a, se colocó sobre una de las partes del bambú de la familia *bambusa oldhamii* como se muestra en la figura 6b. Este fue colocado con ayuda de un poco de etanol con el fin de ablandar la capa protectora del sensor y que este se adhiriera correctamente a la planta. El diseño del circuito de presenta en la figura 6c el cual consta de un divisor de tensión el cual va conectado a un amplificador operacional (LM324). Una vez colocado el sensor en posición se conectó al circuito que se muestra en la figura 6d, por medio del cual se registraron las variaciones en resistividad en el microcontrolador (Microchip ATmega328P, dentro de un Arduino Uno). Es importante mencionar que la adquisición de datos desde el circuito diseñado se realiza por medio del convertidor analógico-digital integrado en el microcontrolador, el cual cuenta con 10 bits de resolución, suficientes para poder medir las variaciones de resistividad del nanosensor por medio de 1028 valores.

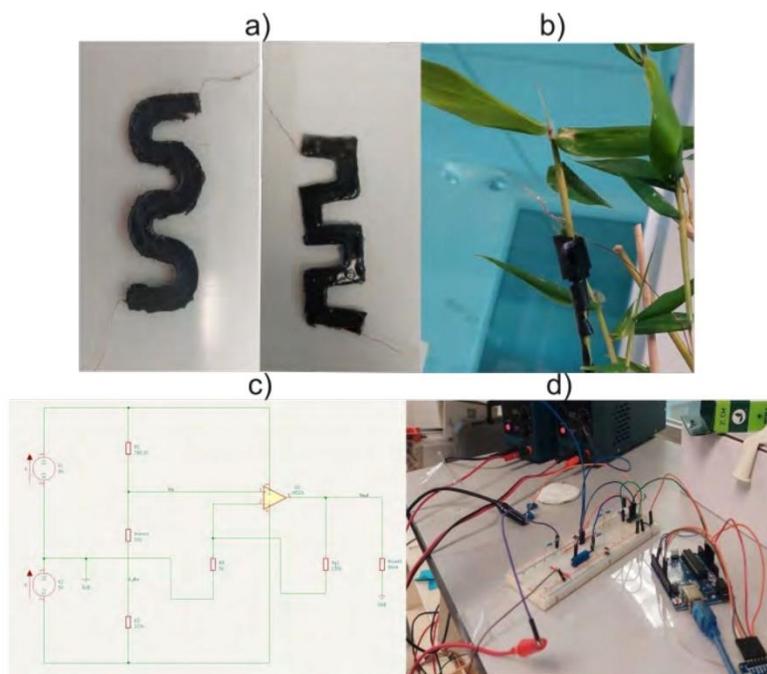


Figura 6.- a) sensores obtenidos del compuesto y la mezcla, **b)** sensor colocado sobre bambú, **c)** esquemático del circuito utilizado para medición del sensor, **d)** circuito implementado para medición del sensor conectado a las fuentes y al microcontrolador para la recolección de la información.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Las siguientes gráficas muestran los resultados de las mediciones de las dispersiones que fueron elaboradas por diferentes periodos de tiempo, los resultados se expresan en kilohms ($k\Omega$), determinados mediante la Ley de Ohm.

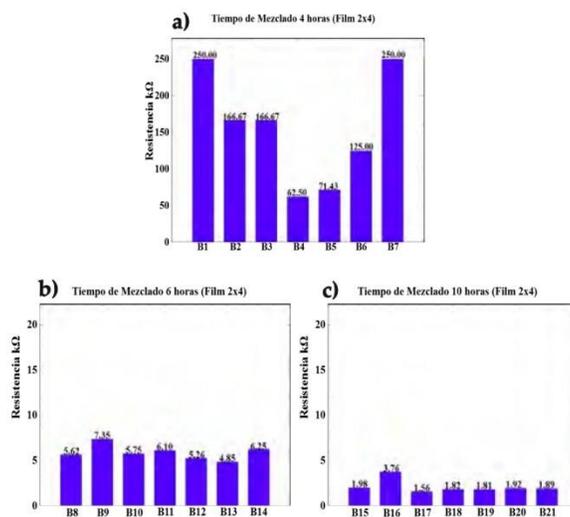


Figura 7.- Evaluación de resistencia de las dispersiones elaboradas. **a)** dispersión que se mezcló por 4 horas, **b)** dispersión que se mezcló por 6 horas, **c)** dispersión que se mezcló por 10 horas.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8 muestra la respuesta en términos de la resistencia del sensor al aplicar deformaciones manuales, con respecto al tiempo. La zona de color azul muestra como el sensor en su estado de resistividad inicial, mientras que la zona de color rosa muestra el cambio en la resistencia del sensor al ejercer deformaciones. La zona en color verde muestra el comportamiento del sensor al dejar de aplicar deformaciones.

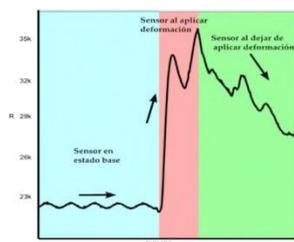


Figura 8.- Comportamiento del sensor al ejercer deformaciones manuales

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 9 muestra el comportamiento del sensor al ser colocado sobre la planta de bambú, a fin de monitorear el crecimiento por medio de la detección de extensión mecánica del nanosensor. En color verde se observan los periodos de incremento en la resistencia del sensor, relacionados con el crecimiento de la planta, mientras que en color rojo se observan periodos de reducción de resistividad, que se asocian con los tiempos en los que dejar de crecer la planta. El sensor se colocó a las 18:00h del día 1, con un muestreo cada 30 minutos por un periodo de 2 días y medio.

La Figura 10 ilustra el comportamiento del sensor al no ser sometido a deformaciones y no ser colocado sobre a ninguna planta, medido como punto de referencia. El resultado mostrado es el promedio de las diversas pruebas que fueron tomadas al sensor, en donde todas las muestras presentaban una baja en la resistencia del sensor al no ser colocado sobre plantas o ejercer sobre esta ninguna deformación.

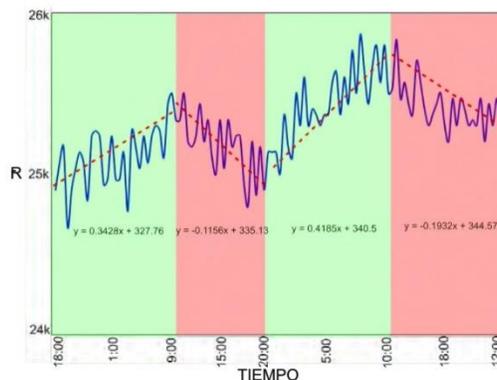


Figura 9.- Comportamiento de la resistencia del sensor colocado sobre bambú respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

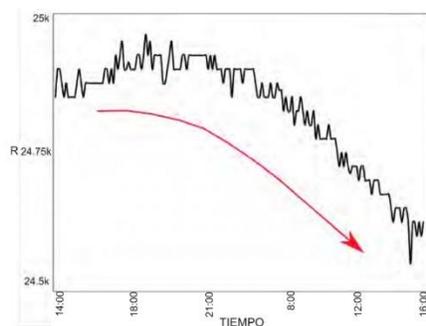


Figura 10.- Comportamiento del sensor sin ser colocado en plantas ni aplicar deformaciones

Fuente: Elaboración propia.

Las fotografías presentadas en la parte superior de la Figura 11 se tomaron diariamente, mientras que las fotografías de la parte inferior se tomaron cada 3 días para el monitoreo visual del crecimiento del bambú.



Figura 11.- Monitoreo de crecimiento del bambú con respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las dispersiones de SWCNTs dispersados en Triton X-100 por diferentes periodos de agitación constante, fueron sometidas a pruebas de conductividad al rociarlas sobre sustratos de resina de silicio. Los resultados mostrados en la Figura 7 indicaron que la dispersión preparada por un tiempo de mezclado de 10 horas exhibe una mejor conductividad eléctrica y una menor resistencia, por lo cual se decidió utilizarla para elaborar el composito final del sensor. Con el composito elaborado, se obtuvieron los sensores mostrados en la Figura 6a, los cuales mostraron una buena conductividad eléctrica, exhibiendo cambios en su resistencia

al aplicar deformaciones manuales como se muestra en la Figura 8, las cuales permiten conocer su comportamiento de respuesta al ser sometido a estas deformaciones.

Se ha comprobado que, aunque el crecimiento de la planta de estudio no genera una deformación significativa en el sensor, se puede percibir un cambio positivo en la línea de tendencia como se ilustra en la figura 9. Es posible apreciar un crecimiento de la planta de estudio durante la tarde y madrugada, donde de acuerdo a el tipo de bambú (en este caso, perteneciente a la familia *bambusa oldhamii*) corresponde adecuadamente a periodos en el día en el que su crecimiento suele ser mayor (Guadua Bamboo SAS, 2020). Además, para el monitoreo del crecimiento de la planta, se midió el grueso del tallo por medio de un vernier, resultando en una circunferencia de 3.1 mm y altura de 13.7 cm, contra una circunferencia de 3.4 mm y una altura de 15.59 cm medidas al tercer día.

En comparación con las pruebas en las que se aplicaron deformaciones manuales al sensor, el cambio en la planta es menor, sin embargo, fueron detectables y cuantificables por medio del nanosensor desarrollado. Así mismo, como se ilustra en la figura 10, el comportamiento del sensor en estado estático (es decir, al no ser sometido a deformaciones) muestra que su resistencia tiende a disminuir hacia un valor mínimo, lo cual demuestra que las curvas de respuesta obtenidas, en donde se observan incrementos de resistividad, pueden ser efectivamente atribuidas al crecimiento de la planta.

En este punto es importante contrastar nuestro trabajo con otros relacionados. Por ejemplo, en un trabajo reciente (Tang et al., 2019) se desarrolló un sensor a base de CNT y grafito utilizando como película un pedazo de látex, para ser colocado sobre frutos para la medición de su crecimiento, la incorporación de los electrodos de este sensor fue mediante el uso de cinta, al igual que el sensor desarrollado en este trabajo es portátil y flexible. Lo que diferencia a nuestro sensor es que nuestra propuesta incorpora los electrodos dentro del sensor, lo que evitaría el movimiento de los electrodos y posibles interferencias de ruido que puedan interferir en la señal medida. Así mismo, nuestro sensor con la capa de PVAc se protege de la humedad evitando así que este se pueda ver afectado por el riego al que son sometidos los

cultivos para su desarrollo. Otro punto importante es que, en el trabajo citado, los CNT fueron adquiridos como tinta comercial, sobre la cual no se conoce el modo de preparación. En nuestro caso, se están utilizando SWCNTs puros para la preparación de la dispersión, y al ser utilizados de este modo permite la funcionalización para en el futuro poder utilizarlos para la detección de otras sustancias.

La implementación de este sensor a base de nanomateriales podría tener un impacto significativo en el cuidado de los cultivos ya sea para el monitoreo del crecimiento de las plantas cultivadas así como para el monitoreo de diferentes variables fisiológicas y morfológicas al modificar los nanosensores para la detección de estas. Por ende, tendría un gran impacto en el desarrollo rural y económico de las áreas agrícolas de los estados de nuestro país. La capacidad de monitorear de manera precisa y en tiempo real el crecimiento de las plantas permitiría tomar decisiones más informadas y oportunas sobre su cuidado, lo que podría aumentar la calidad y la producción de los cultivos y así mejorar la rentabilidad de la agricultura. Por otro lado, es importante tener en consideración los posibles desafíos que pueden surgir durante la implementación del sensor en el campo, donde se requiere asegurar la estabilidad y durabilidad en los diferentes entornos en los que se encuentran los cultivos. El desarrollo e implementación de estos sensores podrían requerir una inversión significativa en investigación y desarrollo, así como en capacitación y educación para su uso. No obstante, el potencial beneficio económico y social podría superar ampliamente los costos a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arndt, N., Tran, H. D. N., Zhang, R., Xu, Z. P., & Ta, H. T. (2020). Different Approaches to Develop Nanosensors for Diagnosis of Diseases. *Advanced Science*, 7(24), 2001476. <https://doi.org/10.1002/advs.202001476>
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- Guadua Bamboo SAS. (2020). *El Bambú es la Planta de Más Rápido Crecimiento del Planeta*. El Bambú Es La Planta de Más Rápido Crecimiento Del Planeta. <https://bit.ly/3oM61p8>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022, December 7). *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*. Cifras Preliminares 2021. <https://bit.ly/3LgbrQG>
- Kumar Khanna, V. (2021). *Nanosensors: Physical, Chemical, and Biological; Second Edition*.
- Li, T., Li, L., Sun, H., Xu, Y., Wang, X., Luo, H., Liu, Z., & Zhang, T. (2017). Porous Ionic Membrane Based Flexible Humidity Sensor and its Multifunctional Applications. *Advanced Science*, 4(5), 1600404. <https://doi.org/10.1002/advs.201600404>
- Liu, C., Zhou, H., & Zhou, J. (2021). The Applications of Nanotechnology in Crop Production. *Molecules*, 26(23), 7070. <https://doi.org/10.3390/molecules26237070>
- Morais, S. (2021). Special Issue: Carbon-Based Nanomaterials for (Bio)Sensors Development. *Nanomaterials*, 11(9), 2430. <https://doi.org/10.3390/nano11092430>
- Neme, K., Nafady, A., Uddin, S., & Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. *Heliyon*, 7(12), e08539. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K.-H., & Chakrabarty, I. (2022). Nanofertilizers: A Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture. *Plants*, 11(19), 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2020). Recent Developments in the Application of Nanomaterials in Agroecosystems. *Nanomaterials*, 10(12), 2411. <https://doi.org/10.3390/nano10122411>

- Serag, M. F., Kaji, N., Gaillard, C., Okamoto, Y., Terasaka, K., Jabasini, M., Tokeshi, M., Mizukami, H., Bianco, A., & Baba, Y. (2011). Trafficking and Subcellular Localization of Multiwalled Carbon Nanotubes in Plant Cells. *ACS Nano*, 5(1), 493–499. <https://doi.org/10.1021/nn102344t>
- Shaw, D. S., & Honeychurch, K. C. (2022). Nanosensor Applications in Plant Science. *Biosensors*, 12(9), 675. <https://doi.org/10.3390/bios12090675>
- Swierczewska, M., Liu, G., Lee, S., & Chen, X. (2012). High-sensitivity nanosensors for biomarker detection. *Chem. Soc. Rev.*, 41(7), 2641–2655. <https://doi.org/10.1039/C1CS15238F>
- Tang, W., Yan, T., Wang, F., Yang, J., Wu, J., Wang, J., Yue, T., & Li, Z. (2019). Rapid fabrication of wearable carbon nanotube/graphite strain sensor for real-time monitoring of plant growth. *Carbon*, 147, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.03.002>
- Zhang, P., Chen, Y., Li, Y., Zhang, Y., Zhang, J., & Huang, L. (2020). A Flexible Strain Sensor Based on the Porous Structure of a Carbon Black/Carbon Nanotube Conducting Network for Human Motion Detection. *Sensors*, 20(4), 1154. <https://doi.org/10.3390/s20041154>
- Zhang, Q., Ying, Y., & Ping, J. (2022). Recent Advances in Plant Nanoscience. *Advanced Science*, 9(2), 2103414. <https://doi.org/10.1002/advs.202103414>
- Zhu, L., Chen, L., Gu, J., Ma, H., & Wu, H. (2022). Carbon-Based Nanomaterials for Sustainable Agriculture: Their Application as Light Converters, Nanosensors, and Delivery Tools. *Plants*, 11(4), 511. <https://doi.org/10.3390/plants11040511>