



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE  
DURANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL  
VALLE DEL GUADIANA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“SISTEMA ELÉCTRICO ESTIMULADO POR VIBRACIÓN PARA  
ESTUDIO FISIOLÓGICO DE ÁRBOL DE MANZANO”**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestro en Ingeniería**

**Presenta:**

Ing. Marco Antonio de la Cruz González

**Director de tesis:**

Dr. Francisco Javier Godínez García

**Co-Director:**

Dr. Josué Ortiz Medina

Durango, Dgo. México, Noviembre, 2024.



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



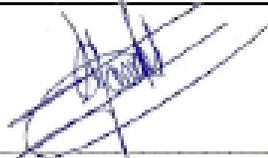
TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MEXICO

**"SISTEMA ELÉCTRICO ESTIMULADO POR VIBRACIÓN PARA ESTUDIO FISIOLÓGICO DE ÁRBOL DE MANZANO"**

**Presenta:**

ING. MARCO ANTONIO DE LA CRUZ GONZALEZ

**COMITÉ TUTORIAL**

Dr. Francisco Javier Godínez García Director	 Firma
Dr. Josué Ortiz Medina Co-director	 Firma
M.C. Eduardo Camero Inda Asesor	 Firma

  
Dra. 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

Victoria de Durango, Dgo. México.

noviembre 2024.



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **29 / Noviembre / 2024**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 656 / 2024.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

**C. MARCO ANTONIO DE LA CRUZ GONZÁLEZ**  
**No. DE CONTROL G14040906**  
**PRESENTE.**

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:

**"SISTEMA ELÉCTRICO ESTIMULADO POR VIBRACIÓN PARA ESTUDIO FISIOLÓGICO DE ÁRBOL DE MANZANO"**

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

**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**



FIGG/ammc.





TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **29 / Noviembre / 2024**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 655 / 2024.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

**C. MARCO ANTONIO DE LA CRUZ GONZÁLEZ**  
No. DE CONTROL G14040906  
**PRESENTE.**

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:

**"SISTEMA ELÉCTRICO ESTIMULADO POR VIBRACIÓN PARA ESTUDIO FISIOLÓGICO DE ÁRBOL DE MANZANO"**

CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	RESULTADOS
CAPÍTULO V	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**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



FIGG/ammc.





**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

## **Agradecimientos**

Les comparto mi beneplácito a través de este documento, como reflejo de dos años de trabajo académico, investigación, de desarrollo profesional y personal.

A mi familia, a mi padre Enrique por su impecable ejemplo y su incansable trabajo, a mi madre Leticia por su respaldo y apoyo incondicional, y a mis hermanos Luis, Sergio y Alejandro de quienes sigo aprendiendo.

A los profesores del programa por su asesoría, apoyo y disposición para la culminación de este proyecto, al Dr. Josué Ortiz Medina por su ejemplo de disciplina y compromiso y al Dr. Francisco Javier Godínez García, por su apoyo no solo académico, sino moral y personal.

A Joyce R. por su ejemplo de tenacidad y determinación. Por alentarme en esta etapa llena de vicisitudes.

Al CONAHCYT por la oportunidad de ser partícipe en el programa.

## Resumen

La nanotecnología y nanomateriales en los últimos años han tomado especial consideración debido a la facilidad con la que sus propiedades pueden ser manipuladas para acondicionar los parámetros físicos, químicos, eléctricos y magnéticos. Su implementación va desde la medicina, medio ambiente, informática, industria y sistemas agrícolas; los cuales han demostrado su potencial en aplicaciones para estudio científico, gestión de riesgos y uso de agua.

Se presentan los resultados obtenidos en el diseño y desarrollo de un elemento sensor (transductor) capaz de responder en parámetros de resistencia eléctrica a un estímulo electromecánico y en respuesta a la variación en el flujo de savia. Se desarrolló a partir de Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT's) que fueron acondicionados con Nitrato de Plata  $AgNO_3$  para potenciar sus propiedades electromecánicas.

Se pudieron obtener respuestas en el transductor que tuvieron una razón de cambio del 10.3% en el valor de resistencia eléctrica con respecto a su valor inicial. El proceso empleado, las pruebas y ensayos se muestran a continuación.

## Abstract

Nanomaterials and nanotechnology are widely used due to the correct treatment, they easily change and modify their parameters and behavior, such as magnetic, mechanic, electric, chemic and magnetic characteristics. They are widely used in several areas such as medicine, environment, informatics and lately in agricultural applications, enhancing and simplifying the existents manners to water use, water-plant relations and hydraulic potential.

The design and development of an element sensor is shown. It is capable of response in terms of their electrical resistance value to an electromechanics signals, in relation to changes of the Sap Flow. The sensor is based on Single Wall Carbon Nanotubes (SWCNT's) and  $A_gNO_3$  Nanoparticles to enhance their electromechanics features.

The electric resistance parameters show their capability to response to these signals, acquiring a change value of 10.3% between the initial and final values. The process design, development and applications are shown as follows.

## Tabla de Contenido

<b>Tabla de Contenido</b> .....	3
<b>Capítulo 1</b> Introducción .....	8
1.1 Planteamiento del problema .....	9
1.2 Objetivos .....	9
1.2.1 Objetivo General .....	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1.3 Hipótesis.....	10
1.4 Justificación .....	10
1.5 Delimitación del problema .....	10
<b>Capítulo 2</b> Marco Teórico.....	11
2.1 Conducción hídrica.....	11
2.1.1 Savia .....	12
2.1.2 Xilema.....	13
2.2 Medición de Flujo de Savia.....	16
2.2.1 Método del balance térmico (Thermal Heat Balance, THB) .....	18
2.2.2 Método de disipación de calor (Thermal Heat Dissipation, THD).....	18
2.2.3 Método de impulso de calor (Thermal Pulse Dissipation, TPD).....	18
2.3 Nanotecnología y Nanomateriales.....	19
2.3.1 Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT's) .....	20
<b>Capítulo 3</b> Metodología .....	22
3.1 Preparación de los Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT's) .....	22
3.2 Preparación nanopartículas .....	23
3.2.1 Citrato de Sodio.....	24
3.2.2 Nitrato de Plata .....	25
3.3 Reducción Nanotubos de Carbono y Nanopartículas de Nitrato de Plata (SWCNT's - <i>AgNO<sub>3</sub></i> NP's) .....	28
3.4 Desarrollo del elemento sensor.....	29
3.4.1 Diseño del transductor .....	30
3.4.2 Incorporación de SWCNT's- <i>AgNO<sub>3</sub></i> NP's en el FILM .....	30
3.5 Pruebas.....	31

3.5.1 Prueba de resistencia eléctrica vs frecuencia .....	32
3.5.2 Prueba No.1 Flujo Forzado .....	34
3.5.3 Prueba No. 2 Flujo Forzado .....	35
3.5.2 Prueba No. 3: Detección de Variación de Flujo.....	36
<b>Capítulo 4</b> Resultados .....	39
4.1 Resultado Prueba Resistencia Eléctrica vs Frecuencia.....	39
4.2 Resultado Prueba No.1 y No. 2 Flujo Forzado.....	39
4.3 Resultados Prueba No. 3 Detección de Variación de Flujo. ....	40
4.4 Pruebas adicionales.....	42
4.5 Resultados Finales.....	43
4.6 Resultados de la investigación .....	43
<b>Capítulo 5</b> Referencias bibliográficas.....	45

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> Uso de agua en plantas. ....	11
<b>Figura 2.2.</b> Representación de las partes principales del tronco. ....	13
<b>Figura 2.3</b> Corte transversal de un tronco: .....	14
<b>Figura 2.4</b> Representación de las propiedades del Xilema. ....	15
<b>Figura 2.5</b> Representación del principio de redundancia en plantas. ....	16
<b>Figura 2.6</b> Métodos de pulso de calor para estimación de flujo de savia. ....	17
<b>Figura 2.7.</b> Representación del Método del Pulso de Calor. ....	19
Figura 8. Tipos de Nanosensores. ....	20
Figura 3.1 Diagrama esquemático dispersión CNT's. ....	22
Figura 3.2 Inicio de dispersión de CNT's en DBSS. ....	23
Figura 3.3 Resultado obtenido homogeneización CNT's. ....	24
Figura 3.4 Citrato de Sodio. ....	25
Figura 3.5 Nitrato de Plata AgNO <sub>3</sub> NP's. ....	26
Figura 3.6 Agitación Nitrato de Plata y Citrato de Sodio. ....	26
Figura 3.7. Agitación de Nitrato de Plata y Citrato de Sodio. ....	27
Figura 3.8. Pigmentación en la preparación de nanopartículas de Nitrato de Plata. ....	28
Figura 3.9. Inicio del proceso de reducción de SWCNT's y AgNO <sub>3</sub> NP's ....	29
Figura 3.10 Esquema FILM utilizado como elemento sensor ....	30
Figura 3.11 Depósito de SWCNT's- AgNO <sub>3</sub> NP's en el FILM. ....	31
Figura 3.12 Acondicionamiento del FILM. ....	32
Figura 3.13. Esquemático Prueba Estimulo mecánico. ....	33
Figura 3.14 Circuito prueba Resistencia Vs Frecuencia. ....	33
Figura 3.15 Circuito habilitado para prueba Resistencia vs Frecuencia. ....	34
Figura .16 Modelo Prueba de Flujo Forzado No .1. ....	35
Figura 3.17 Modelo Prueba Flujo Forzado No. 2 ....	36
Figura 3.18 Disposición de FILM Prueba No.3 Detección de variación de flujo forzado ....	37
Figura 3.19 Modelo Prueba No. 3 Detección de Flujo de Savia ....	38
Figura 4.1 Resultados Prueba Resistencia Eléctrica vs Frecuencia (Ohms Vs Hz) ....	39
Figura 4.1 Resultado Prueba No 3. Replica de señal en el secundario. ....	41
Figura 4.2 Resultado Prueba No. 3: Incremento del Valor de Voltaje Pico a Pico. ....	41
Figura 4.5 Resultados Prueba Resistencia Eléctrica vs Tiempo (Ohms vs Horas) ....	42

## Índice de tablas

Tabla 2.1. Comparación savia bruta y savia elaborada.....	12
Tabla 2.2 Propiedades y características de los nanosensores. ....	21

## Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 2.1</b> Calculo densidad de Flujo de Savia .....	17
<b>Ecuación 2.2</b> Calculo del Flujo de Savia.....	17

## Capítulo 1 Introducción

Actualmente el desarrollo y crecimiento de los mercados han propiciado un crecimiento en la competitividad entre los países exportadores, donde la demanda de productos y procesos altamente eficientes está a la orden del día. El desarrollo de las tecnologías agrícolas y pecuarias no son la excepción, ya que, en la necesidad de obtener productos de mayor calidad maximizando el rendimiento de los recursos necesarios para su producción, se han implementado cada vez más el uso de herramientas y dispositivos que facilitan el monitoreo, análisis y control de las variables implicadas en su desarrollo.

El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), en las estadísticas correspondientes a la Producción Anual Agrícola indicó que el estado de Durango tuvo un total de 5,635.09 hectáreas cosechadas para la modalidad de riego y temporal a cielo abierto de cultivo de manzanas, siendo el tercer estado que obtuvo un mayor valor de producción por hectárea, solo después de Chihuahua y Puebla, siendo por lo tanto, uno de los estados que más ingresos recaudó por concepto de la producción de este fruto en México, ante esta premisa, se busca impulsar el desarrollo de esta actividad mediante el estudio, análisis, desarrollo y aplicación de técnicas y prácticas aplicables en los procesos agroindustriales que la integran.

El desarrollo del sector agrícola precisa examinar el comportamiento de las propiedades dinámicas internas del árbol, así como la relación e influencia de los factores que intervienen en su desarrollo, esto es posible mediante la aplicación de ensayos o pruebas y se les conoce como estudios fisiológicos. Los estudios fisiológicos abarcan todo tipo de observaciones con propósitos de investigación (Fernández & Gyenge, 2010), van desde las relacionadas con la activación de genes y cambios metabólicos a nivel celular frente al estrés, pasando por el comportamiento de las hojas en

respuesta al aumento de la temperatura durante el día, los ajustes fisiológicos estacionales, los cambios anatómicos y morfológicos de individuos genéticamente similares creciendo en sitios con distinta oferta de recursos.

## 1.1 Planteamiento del problema

Los métodos existentes para el cálculo del flujo de savia son procedimientos invasivos, por medio de la inserción de sondas de prueba directamente en el tejido vivo de la planta. Los procedimientos demandan especial atención en la colocación de las sondas ya que, si la alineación y la distancia no es la adecuada, el resultado puede verse alterado.

La alineación de las sondas además debe de colocarse de manera que haya un contacto sólido y con el tejido con mayor hidroactividad, de lo contrario, el valor de la prueba probablemente sea erróneo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo General*

Diseñar y desarrollar un transductor o elemento sensor fabricado a base de nanotubos de carbono, capaz de modificar sus valores de resistencia eléctrica en función de la variación del flujo de savia.

### 1.2.2 *Objetivos específicos*

- I. Analizar los distintos métodos y dispositivos que permiten realizar mediciones del flujo de savia en el árbol.
- II. Diseñar y desarrollar un dispositivo capaz de generar una variación en el valor de resistencia eléctrica del elemento sensor en función de estímulo electromecánico relacionado al cambio del flujo de savia.

### 1.3 Hipótesis

Es posible desarrollar un elemento sensor a base de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT's) que presente una respuesta en su valor de resistencia eléctrica en respuesta a un estímulo electromecánico y en función al valor de flujo de savia.

### 1.4 Justificación

El cultivo de manzana en el estado de Durango se encuentra en el tercer lugar a nivel nacional en cuanto a producción por hectárea, además que representa una gran parte de los ingresos en el sector agrícola del Estado. Por otra parte, el tema del uso eficiente de la energía ha ido en incremento en los últimos años para los agricultores y fruticultores, que han ido incorporando técnicas para la gestión y uso de agua, reduciendo como consecuencia los costos de inversión. Además, al implementar sistemas para el control de riego se puede regular y personalizar las necesidades de cada espécimen como la demanda hídrica y entre otros parámetros; esta a su vez, esta relacionada con el estrés hídrico y este es un indicador que determina las condiciones y características finales del fruto.

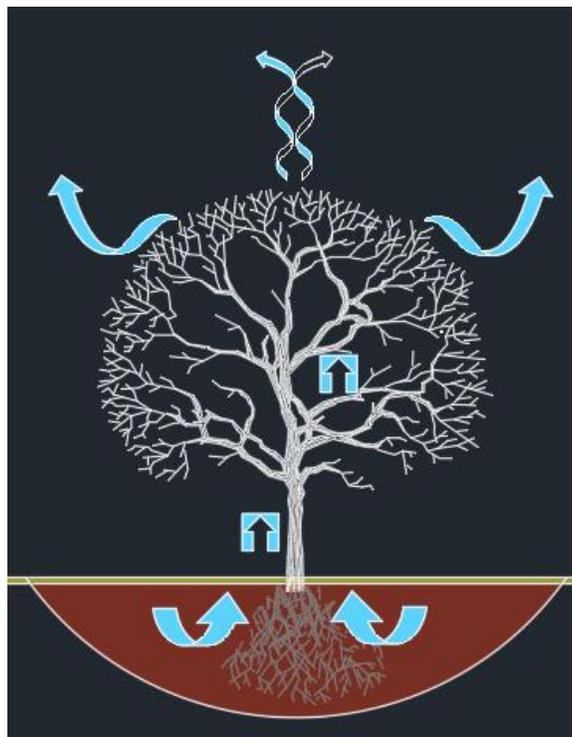
### 1.5 Delimitación del problema

Dadas las condiciones y factores previamente mencionados, en el desarrollo se limitó al diseño y desarrollo del transductor o elemento sensor que perciba los cambios en las propiedades dinámicas del árbol, estableciendo así la base para la continuación y futuro desarrollo del sistema, con miras a la conclusión y modelado del nuevo método de Flujo de Savia.

## Capítulo 2 Marco Teórico

### 2.1 Conducción hídrica

El transporte hídrico se produce en el tejido activo del xilema de la planta por medio de un gradiente de potencial negativo ocasionado por la transpiración de las plantas a través de las hojas. (Sun et al., 2022). Este gradiente genera fuerza suficiente para que el fluido que se encuentra en las hojas de la parte inferior tenga un movimiento ascendente capaz de vencer la fuerza de gravedad (por una distancia mínima), a su vez, esas hojas absorben el fluido que está en las hojas subyacentes, provocando que ese diferencial de potencial negativo se reproduzca a lo largo de todo el tronco hasta llegar a las raíces, en donde se empieza a disponer del recurso hídrico del terreno (figura 2.1). El agua ingresa a las raíces atravesando una serie de capas de células hasta llegar al tejido conocido como xilema ((Fernández & Gyenge, 2010), por medio del cual, el agua asciende y es transpirada por las hojas a la atmósfera.



**Figura 2.1** Uso de agua en plantas.  
Fuente: Elaboración Propia. AutoCAD

### 2.1.1 Savia

La savia es el compuesto que da como resultado la captación del agua del suelo además de algunos compuestos propios del terreno, minerales principalmente.

La savia se clasifica en dos tipos: savia bruta (sucia) y savia elaborada (limpia). La savia bruta es la captada directamente tal como se dispone en el recurso hídrico del terreno. La savia elaborada, se produce en las hojas como consecuencia de la actividad fotosintética, mediante la cual los nutrientes son convertidos en glucosa (Fernández-Golfin et al., 2020).

En la tabla 2.1, se muestran las principales diferencias del tipo de savia.

<b>Tipo</b>	<b>Estado</b>	<b>Transporte</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Savia bruta</b>	Compuesta de agua y minerales del suelo principalmente.	El transporte de savia bruta es realizado a través del xilema.	Conducir hasta las hojas la savia bruta captada por las raíces.
<b>Savia Elaborada</b>	Se compone de agua azúcares y minerales disueltos.	EL movimiento de la savia elaborada se realiza por medio del floema.	Después de la fotosíntesis, se distribuye según la demanda al resto del organismo.

Tabla 2.1. Comparación savia bruta y savia elaborada.

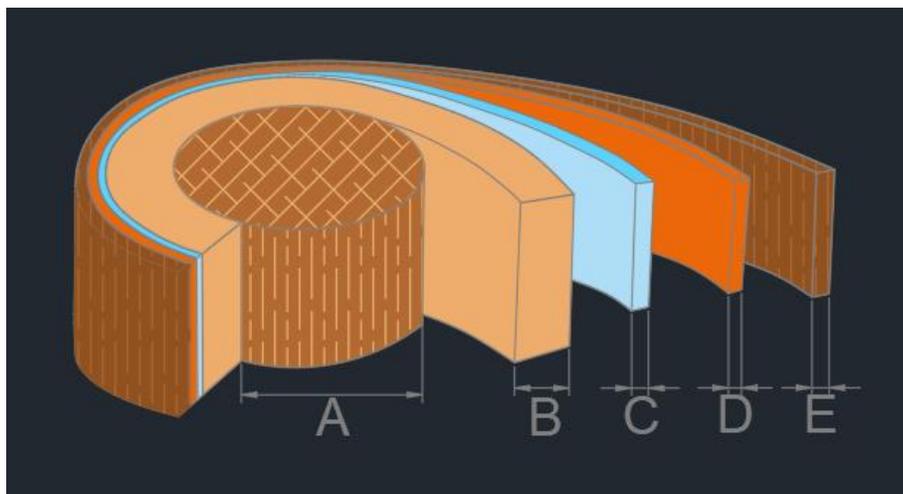
Fuente: Elaboración propia.

El flujo de savia es la variable principal en la representación de la fisiología de la planta. En la agricultura de precisión, tiene una relación directa con el estrés hídrico y la sobreirrigación (González-Altozano et al., 2008). El estar al tanto del flujo de savia puede ser un apoyo útil para estimar las condiciones del fruto de los árboles, también puede servir como base para determinar el

tiempo y frecuencia de irrigación a los fruticultores. Entre otros factores que influyen en el movimiento de agua dentro de las plantas, la cantidad de luz es la más importante (Jarvis P. G., 1976).

### 2.1.2 Xilema

El movimiento de agua en las plantas ocurre principalmente a través del xilema (Boini et al., 2019). El agua se evapora de las plantas mientras los estomas se encuentran abiertos y el dióxido de carbono está siendo admitido. Esta cantidad de agua es reemplazada captada en las raíces y transportada en los conductos del tejido del xilema hacia el lugar de evaporación (Kolb et al., 1996). El xilema además de transportar la savia, tiene como función brindar soporte estructural al organismo, se conforma en su parte interna por el duramen y en su parte externa por la albura (figura 2.2), que es la zona con mayor capacidad de conducción hídrica del xilema. Si se comparan distintos puntos del radio del tronco para la medición de flujo de savia, se podrá observar que la parte con mayor hidroactividad del tronco es la parte externa (albura), debido a que los anillos externos al ser más jóvenes tienen menor resistencia para la conducción hídrica.

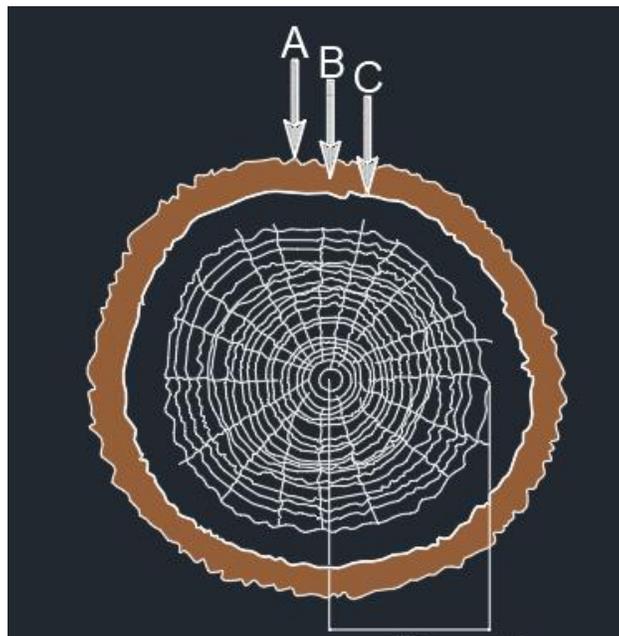


**Figura 2.2. Representación de las partes principales del tronco.**

A: Duramen + B: Albura = Xilema, C: Cambium, D: Floema, E: Corteza. Fuente: Elaboración propia. AutoCAD

- A. Duramen: Es la parte interior del Xilema, tiene un propósito esencialmente mecánico, lo que es posible debido a que se conforma en mayor parte de células anatómicamente muertas.
- B. Albura: Parte externa del Xilema que alija la mayor concentración de células activas, su función principal es el movimiento de la savia bruta en la vía raíces-hojas.
- C. Cambium: Esta sección se ubica en el centro del Xilema y el Floema, a partir de esta zona se generan los crecimientos del árbol, generando tejido en dirección interna para el Xilema, y para el Floema en dirección opuesta.
- D. Floema: Realiza la producción de glucosa, nutrientes y minerales disueltos que conforman la savia elaborada, a partir de la savia bruta y a través de la fotosíntesis.
- E. Corteza: Brinda una protección al árbol contra las amenazas del medio, insectos, animales, conatos de incendio, etc.

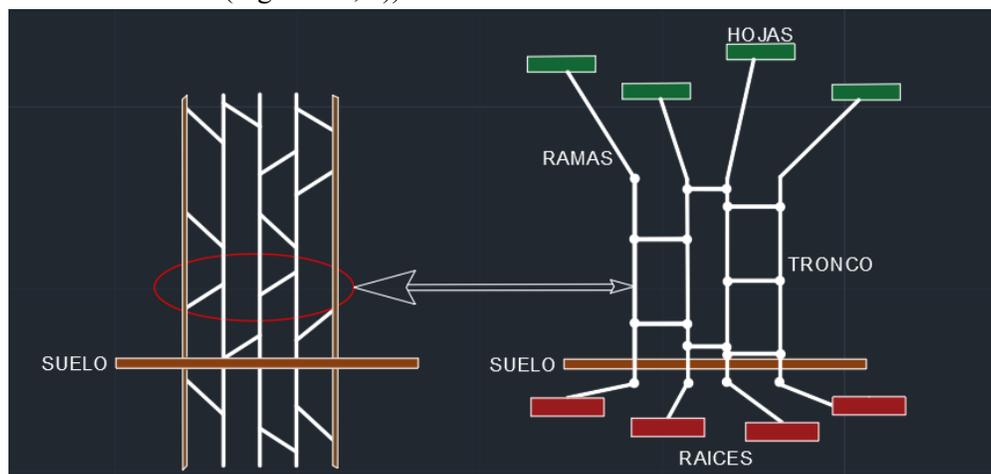
En la figura 2.3, se observa el corte transversal de un tronco, esta vez identificados desde el punto externo (corteza) y hacia el interior (xilema).



**Figura 2.3 Corte transversal de un tronco:**  
 A: Corteza, B: Floema, C: Cambium, D: Albura + E: Duramen = Xilema. Fuente: Elaboración propia. AutoCAD

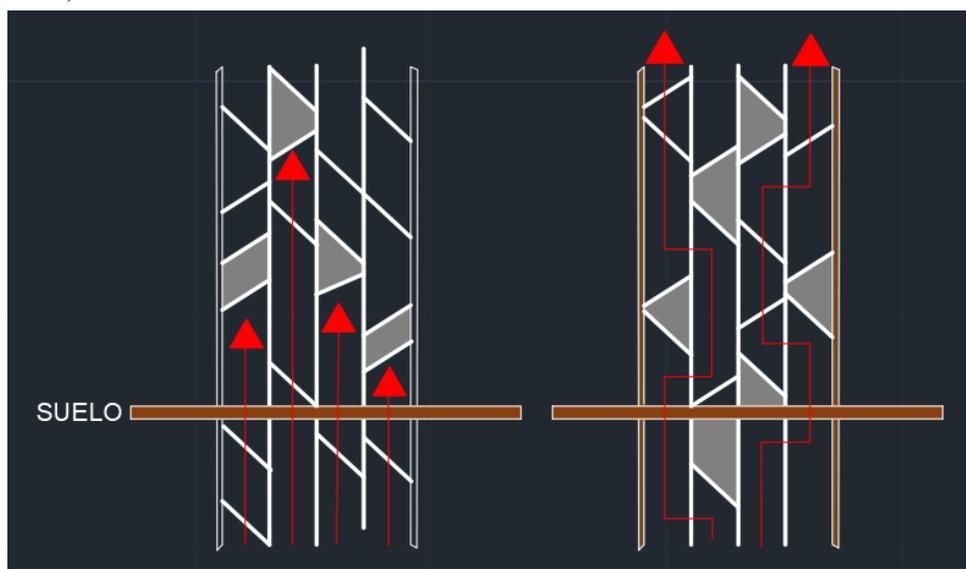
El Xilema, además, funciona bajo tres cualidades importantes: integración, compartimentación y redundancia (Cruziat et al., 2002).

- A. Integración: Se refiere a la manera en que el sistema vascular se encuentra conectado, funciona bajo un mismo sistema interconectado, un tipo de red (figura 2.4, b)), en la cual, las raíces se encuentran interconectadas a distintas ramas y no únicamente con una. En otras palabras, el agua tiene la capacidad de moverse no sólo en dirección vertical (ascendente) sino lateral a través de las membranas propias del tejido.
- B. Compartimentación: Se refiere a la capacidad de producir pequeños compartimentos (Figura 2.4, a)) en el interior del conducto hídrico al ingresar aire, con un solo propósito; permitir el flujo de agua y evitar el flujo de aire.
- C. Redundancia. Es la propiedad que presenta el tejido al flujo continuo de la savia, mediante el contacto lateral del tejido, si en la trayectoria ascendente se encuentra obstruida la vía para el flujo (Figura 2.5 b)), es posible continuar de manera lateral y ascender por un conducto paralelo al obstruido, permitiendo así el flujo continuo de las savia. (Figura 2.5, b)).



**Figura 2.4 Representación de las propiedades del Xilema.**  
a) Compartimentación. b) Integración. Fuente: Elaboración Propia. AutoCAD.

La medición del movimiento de savia en el tejido leñoso ha sido ampliamente usada para la estimación de la tasa de transpiración en plantas (Smith & Allen, 1996). Esto es importante ya que estudios han demostrado que la tasa de transpiración y el potencial hídrico del suelo pueden resultar en un crecimiento reducido de la planta, en el tamaño y calidad del fruto debido al estrés hídrico (Al-Yahyai, 2011).



**Figura 2.5 Representación del principio de redundancia en plantas.**  
a) Sistema no redundante. b) Sistema Redundante. Fuente: Elaboración Propia. AutoCAD.

## 2.2 Medición de Flujo de Savia

Como se revisó en el apartado 2.1.1., la savia es el fluido encargado de transportar agua y nutrientes a través de la planta. La Densidad de Flujo de Savia ( $cm/h$ ) relaciona directamente la cantidad de agua transpirada por la planta ( $L/h$ ) dividida por la sección hidroactiva ( $cm^2$ ). Es el indicador mediante el cual se pueden analizar la relación agua-planta y las variaciones dinámicas del agua. Estos aspectos son ampliamente usados para determinar la cantidad de agua requerida y los requerimientos para el control de irrigación (Morton et al., 2016).

Los principales métodos utilizados actualmente para la medición de flujo de savia se basan en el principio del pulso de calor (Figura 6). Los métodos basados en el pulso de calor son empleados

en la estimación de la densidad del flujo de savia, analizando la respuesta de la planta a la estimulación térmica en los canales conductores (Flo et al., 2019).



*Figura 2.6 Métodos de pulso de calor para estimación de flujo de savia.*

*Fuente: Elaboración Propia. [www.pixlr.com/x](http://www.pixlr.com/x)*

De manera general, estos métodos para la medición del flujo de savia se basan en un divisor de temperatura conformado por dos termopares (termocuplas), una de ellas contiene un elemento calefactor que, al activarse, el diferenciador de temperatura genera un voltaje equivalente a la temperatura. Las sondas se colocan separadas diez o quince centímetros evitando que la termocupla se vea influenciada por el elemento calefactor. EL valor en el diferencial de temperatura depende de la disipación térmica producida por el fluido en el árbol (Alvarado-Ortega et al., 2021). Este método arroja una diferencia de temperatura  $\Delta T^\circ$  en  $C^\circ$ , el cual permite calcular la densidad de flujo de savia  $J_s$  [ $ml/cm^2 min$ ]:

$$J_s = 0.714 [(\Delta T_{max} / \Delta T_{real}) - 1]^{1.231}$$

*Ecuación 2.11 Calculo densidad de Flujo de Savia*

De esta manera, el flujo de savia  $F$ , en  $ml/min$  puede calcularse mediante (ecuación 2.2):

$$F = J_s A_x$$

*Ecuación 2.2 Calculo del Flujo de Savia*

Donde:  $A_x$  representa el área del xilema activo a la altura de la inserción de las sondas.

### *2.2.1 Método del balance térmico (Thermal Heat Balance, THB)*

Este método se basa en que, en un sistema ideal en donde no hay pérdidas de calor, existe una igualdad entre el calor disipado de una sección por un flujo de agua y la cantidad de calor provista a la misma (Čermák et al., 1973). Se aplica calor a la circunferencia entera del tronco o tallo rodeándolo con el calefactor, la densidad de flujo de savia obtenida mediante el balance de flujo de calor entrante y saliente de una sección calentada del tronco (Baker & Nieber, 1987).

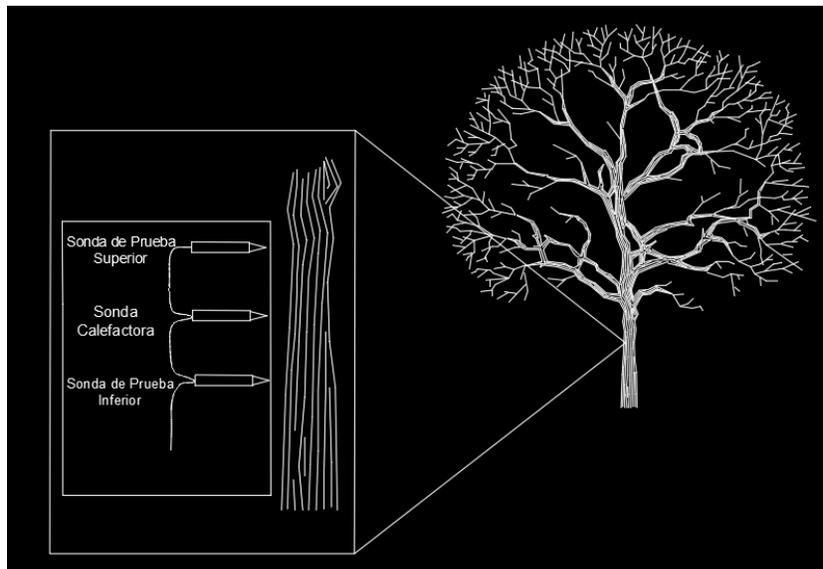
### *2.2.2 Método de disipación de calor (Thermal Heat Dissipation, THD)*

El Método de Disipación de Calor consiste en una estimación a través de dos sensores de temperatura (sondas) que se introducen en el xilema hidroactivo del árbol en forma radial. Uno de estos sensores se provee de un conductor enrollado que funciona como calefactor (resistencia), el cual, a través del estímulo térmico, el fluido que está en movimiento alrededor de la sonda indica la tasa de disipación de calor con la que finalmente se puede calcular el flujo de savia de la planta. Las principales ventajas del Método de Disipación de Calor son bajos requerimientos previos y de equipo, fácil instalación, cálculos directos para el cálculo de flujo y su costo relativamente bajo (Dix & Aubrey, 2021).

### *2.2.3 Método de impulso de calor (Thermal Pulse Dissipation, TPD)*

Este Método tiene como principio el determinar el tiempo que le toma recorrer a un impulso de calor desde el calefactor hasta el sensor en sentido de la dirección del movimiento de savia. Para este método es necesario tener en consideración la sección de área hidroactiva, velocidad del flujo (movimiento de savia) y la geometría del tronco. Para su aplicación, se realizan perforaciones en el tejido del tronco, en donde se colocan el sensor y el calefactor, se colocan con dos sensores a

distancias iguales arriba y abajo del calefactor (Figura 2.7), el tiempo en percibir el estímulo térmico es el objetivo de esta medición y para la estimación del flujo de savia (Swanson, 1981).



**Figura 2.7. Representación del Método del Pulso de Calor.**

*Fuente: Elaboración Propia. AutoCAD.*

### 2.3 Nanotecnología y Nanomateriales

Los sensores son dispositivos a nano escala que monitorean variables físicas tal como fuerza, presión, flujo, temperatura, deformación mecánica entre otros parámetros que convierten en señales que pueden ser detectadas, procesadas y evaluadas (Murjani et al., 2022). A través de los nanocompuestos y reducción de compuestos, se pueden modificar la estructura química de los nanomateriales y por lo tanto, sus características físicas, eléctricas, magnéticas, etcétera. Los nanosensores no siempre son lo suficientemente pequeños para detectar y medir sucesos a nano escala, pueden conformar dispositivos mucho más grandes que aprovechan las propiedades de los materiales para detectar y medir eventos a nano escala (Gendron & Bubak, 2023). En la Figura 8, se clasifican los nanosensores según su principio de funcionamiento (Javaid et al., 2021).

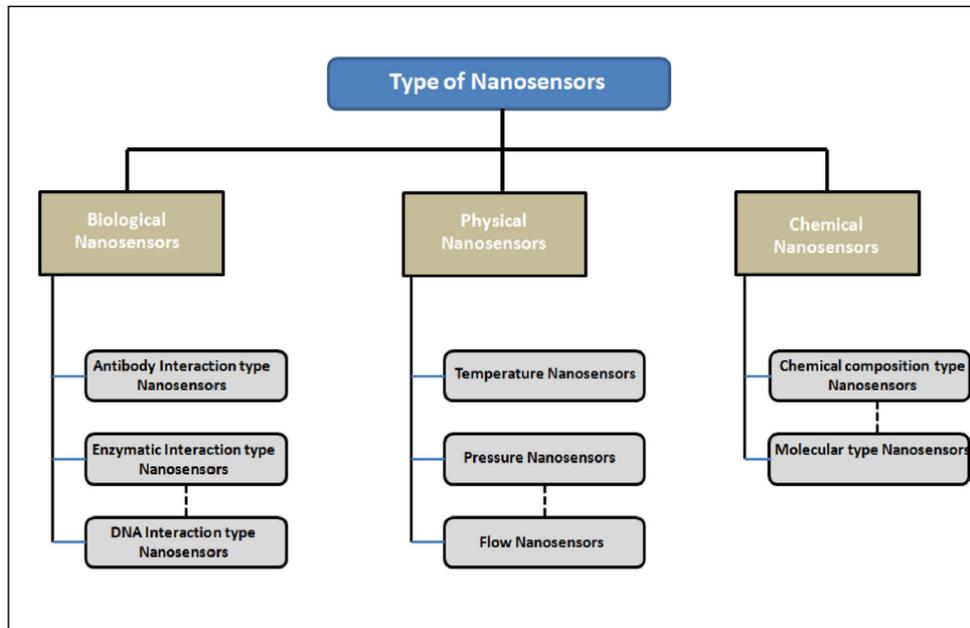


Figura 8. Tipos de Nanosensores.

### 2.3.1 Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT's)

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). Los nanotubos de carbono de pared simple SWCNT's cilindros enrollados de grafeno, huecos, compuestos de una sola capa de átomos de carbono (Hierold et al., 2007). Es por esto que los materiales a base de carbono, tal como los nanotubos de carbono unidimensionales (CNT's) y el grafeno bidimensional han atraído la atención en la preparación de materiales avanzados, esto por su estructura y propiedades únicas, tal como alta conductancia e impresionante conductividad térmica. En la tabla 2.2 se muestran las principales características de nanosensores.

Parámetros y características de los nanosensores.	
Parámetro.	Propiedad.
<b>Sensibilidad</b>	Cambio en el valor de salida por unidad de cambio en la variable de entrada.
<b>Selectividad</b>	Capacidad de discriminación del sensor con respecto a los analitos interferentes, que son fuente de ruido en la salida.
<b>Tiempo de respuesta</b>	El tiempo que tarda el sensor en alcanzar el 63% del valor final de la variable detectada.
<b>Linealidad</b>	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.
<b>Característica de calibración</b>	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.
<b>Resolución</b>	Cambio más pequeño medible en el valor del analito que puede ser detectado por el dispositivo.

*Tabla 2.2 Propiedades y características de los nanosensores.*

## Capítulo 3 Metodología

En el siguiente apartado se describe el proceso y las vías que se tomaron para el diseño, elaboración y desarrollo del elemento sensor a base de SWCNT's. Se describen los procedimientos, métodos, pruebas y ensayos. Así también se describen las síntesis, dispersiones y reducciones que se emplearon durante el desarrollo del proyecto

### 3.1 Preparación de los Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT's)

La funcionalización no covalente utilizada se basó en surfactantes como lo fueron DBSS (Dodecil Bencén Sulfonato de Sodio) 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 fabricación de sensores resistivos a base de nanotubos de carbono se realizaron diferentes dispersiones (Figura 3.1), las cuales contienen 50 ml de Tritón X-100 (solución surfactante al 1% en agua), a los cuales se les añadió 600 mg de nanotubos de carbono (99.8%, Sigma Aldrich®) los cuales fueron colocados en un homogeneizador por 2 horas, hasta lograr una mezcla homogénea de un color oscuro. Este tipo de dispersión es considerada como un método no destructivo y permite conservar las propiedades de los materiales basados en carbono.

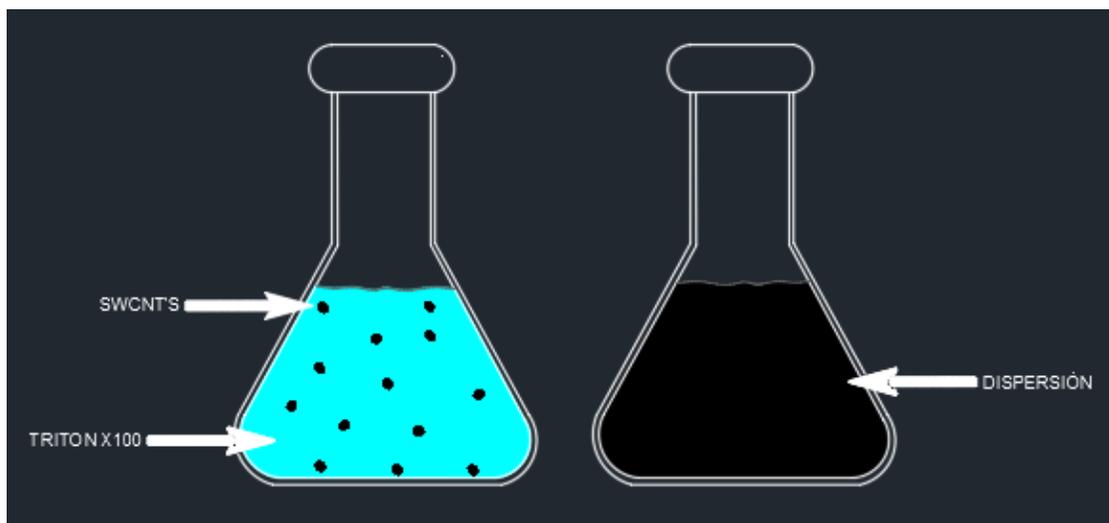


Figura 3.1 Diagrama esquemático dispersión CNT's.

En la Figura 3.2 a) se observa el inicio de la preparación de la dispersión de los CNT's que se representó en la imagen 3.1. Se muestra la colocación inicial de los CNT's en el surfactante Triton x100 (DBSS). En el inciso b), se muestra el inicio del proceso de homogeneización



*Figura 3.2 Inicio de dispersión de CNT's en DBSS.  
a) Depósito de CNT's en DBSS      b) Homogeneización*

### 3.2 Preparación nanopartículas

Cumplido el tiempo indicado de dos horas, se le añaden 50ml de agua destilada (quedando en 100ml el volumen total aproximadamente). Posteriormente se deja reposar por un par de horas o hasta confirmar que la mezcla se encuentra homogeneizada, de lo contrario, se somete a agitación por periodos de 30 minutos hasta conseguir la consistencia deseada.

En la Figura 3.3 se observa la mezcla de CNT's y DBSS terminada. Las propiedades electromecánicas de los SWCNT's son de las más relevantes para el sensado de variables mecánicas. Mediante experimentos han sido usados como piezorresistores en los que han demostrado su potencial para una gran variedad de aplicaciones (Hierold et al., 2007).



Figura 3.3 Resultado obtenido homogeneización CNT's.

### 3.2.1 Citrato de Sodio.

Para poder hacer la reducción las nanopartículas de Nitrato de Plata ( $AgNO_3$  NP's) y los SWCNT's es necesario acondicionar la sustancia en forma previa para conseguir la adhesión entre las nanopartículas NP's. Existen distintos métodos para conseguirlo, utilizan Acido Ascórbico, Cloruro de Potasio y como en este caso, Citrato de Sodio. El proceso fue el siguiente:

Se prepara la cantidad indicada de Citrato de Sodio (Figura 3.4, a)), que para este caso será de 100mg (Figura 3.4 b)), la cual se agitará con 10ml de agua destilada, por el tiempo necesario para alcanzar una solución homogénea, aproximadamente sesenta minutos. La sustancia obtenida se deja en reposo, en espera de ser requerida para el proceso de reducción de las  $AgNO_3$  NP's.



Figura 3.4 Citrato de Sodio.  
 a) Presentación usada Citrato de Sodio.      b) Cantidad usada de Citrato de Sodio

### 3.2.2 Nitrato de Plata

Riviére y sus colaboradores han estudiado diferentes tipos de nanoestructuras de Plata  $A_g$  empleados como rellenos (como Nanocables y nanoesferas) y su influencia en la conductividad térmica y eléctrica. Además, las nanopartículas de Plata han demostrado potencial para ser empleados como semiconductores, aplicaciones eléctricas de alta temperatura, sector aeroespacial y en materias primas de automóviles (Hu et al., 2022).

Para poder hacer uso de las nanopartículas de Plata es necesario su acondicionamiento previo para poder conseguir la reducción con los SWCNT's. La preparación del Nitrato de Plata (Figura 3.5, a) se realizó como sigue:

- I. Se toma la cantidad indicada de Nitrato de Plata (Figura 3.5 b) en este caso, 600mg, los cuales serán mezclados con 200ml de agua destilada mediante una placa agitadora

y calefactora a 60° por sesenta minutos. Se realiza una mezcla inicial con una fracción del agua destilada de momento.



Figura 3.5 Nitrato de Plata  $AgNO_3$  NP's.

- II. La sustancia preparada en el punto 3.2.1 se vierte mediante un gotero a la preparación de  $AgNO_3$  NP's mientras se esté agitando como lo indica el paso I. Una vez depositado el Citrato de Sodio en el contenido del Nitrato de Plata, se mantienen en agitación en la placa calefactora por sesenta minutos más (Figura 3.6).

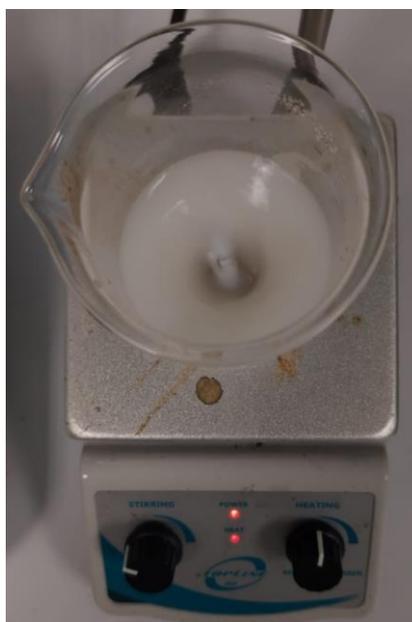
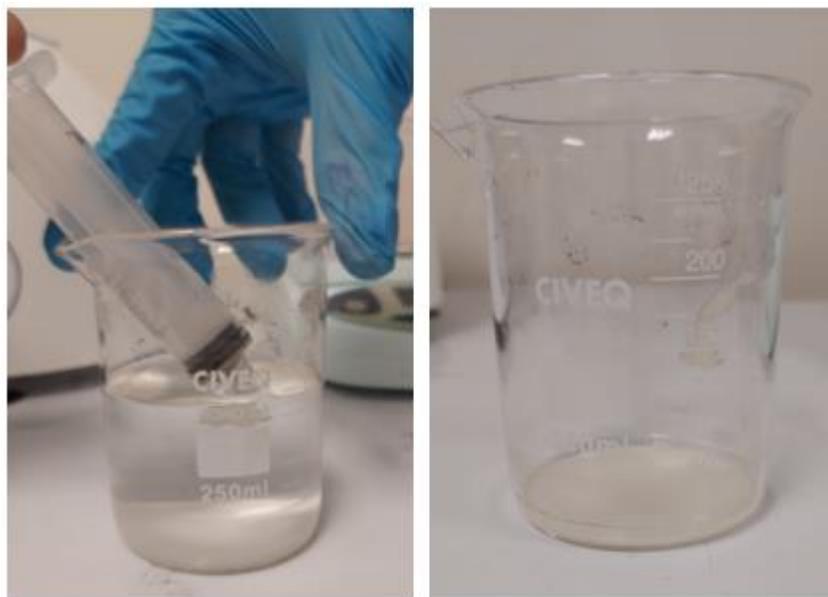


Figura 3.6 Agitación Nitrato de Plata y Citrato de Sodio.

- III. Completado el tiempo, se incorpora la cantidad restante de agua destilada pendiente para el Nitrato de Plata, tomando un volumen aproximado de 200ml. Esta solución se incorpora a la placa calefactora para su agitación por sesenta minutos más.
- IV. Una vez mezclados el Citrato de Sodio y el Nitrato de Plata, se deja enfriar y reposar la sustancia hasta que se pueda observar que se forma un asiento en el fondo del vaso. Cuando esto suceda, sin causar agitación, mediante una jeringa de 10ml se extrae el líquido sobrenadante (Figura 3.7, a) de la solución hasta retirarlo casi en su totalidad (Figura 3.7, b).



*Figura 3.7. Agitación de Nitrato de Plata y Citrato de Sodio.*

- V. Al soluto asentado en el vaso, se le agregan 50ml de agua destilada y se somete a agitación en placa calefactora por sesenta minutos a 60° C. Una vez concluido el tiempo de mezclado, se deja asentar nuevamente hasta poder apreciarlo en el fondo

del vaso. Ya asentada la solución, se retira el sobrenadante casi en su totalidad nuevamente.

- VI. Cada ocasión que se repite el paso V cuando se termina de asentar la muestra, debe mostrar una coloración más oscura que la anterior, generalmente comienza a tomar una pigmentación amarillácea. El paso IV y V se deben repetir hasta que la coloración de la sustancia se muestre amarilla/marrón tal como en la figura 3.8. Este es el indicador que la mezcla está en condiciones óptimas para su uso.

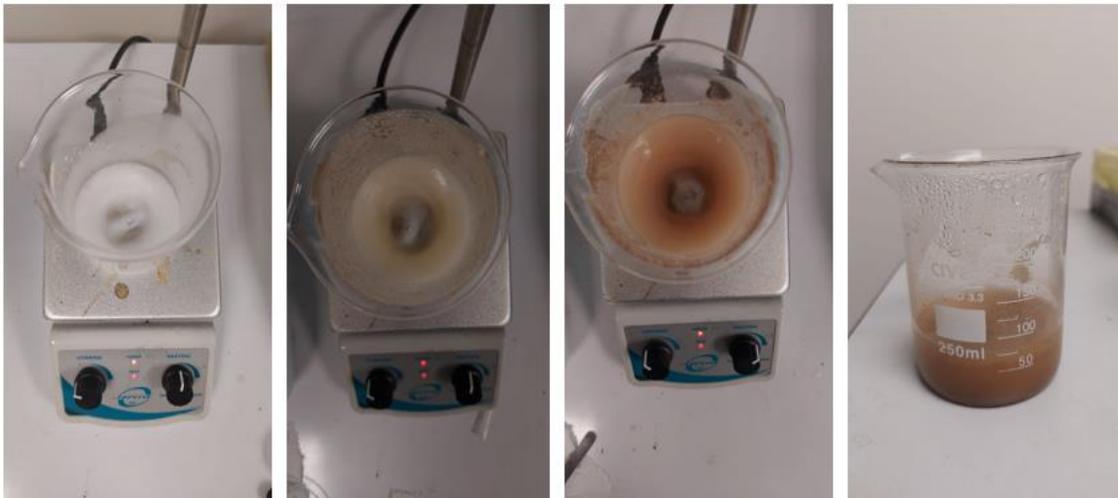


Figura 3.8. Pigmentación en la preparación de nanopartículas de Nitrato de Plata.

### 3.3 Reducción Nanotubos de Carbono y Nanopartículas de Nitrato de Plata ( $SWCNT's - AgNO_3$ NP's)

Al realizar esta reducción de sustancias, lo que se busca es obtener una mezcla homogénea que albergue la sinergia de las propiedades de ambas sustancias. La uniformidad de las Nanopartículas de Plata en la superficie de las Nanotubos de Carbono influye directamente en las características eléctricas del compuesto. Además, la linealidad y sensibilidad resultante puede manipularse mediante la concentración de  $AgNO_3$  NP's. (Zhang et al., 2015).

Una vez alcanzado el estado deseado de las sustancias, la reducción se realiza de la siguiente manera:

- I. De forma arbitraria, se tomaron 20ml de  $AgNO_3$  NP's y 20ml de SWCNT's (Figura 3.9), los cuales se mezclaron por sesenta minutos en el homogeneizador.
- II. Al concluir la homogeneización, la sustancia se debe encontrar terminada y en condiciones para su uso o aplicación.



Figura 3.9. Inicio del proceso de reducción de SWCNT's y  $AgNO_3$  NP's

#### 3.4 Desarrollo del elemento sensor.

Las Nanopartículas de Plata interactúan de forma sencilla con otras partículas e incrementan su eficiencia, por otra parte, han recibido atención debido a sus propiedades físicas, químicas y ópticas (Mavani & Shah, 2013). En la búsqueda de las características óptimas en el parámetro de resistencia eléctrica particularmente ante un estímulo electromagnético, se optó por este compuesto. Las nanopartículas de plata ( $Ag$ -NP's) son capaces de modificar la superficie de los CNT y reducir la resistencia entre sus caras, potenciando sus propiedades mecánicas, químicas y eléctricas (Chettri et al., 2022).

### 3.4.1 Diseño del transductor

Se optó por aplicar el compuesto en un segmento de Papel Kraft de dimensiones 10x10cm (Figura 3.10), considerando el requerimiento de una variación a un estímulo electromagnético, por lo que otro tipo de compuestos como PDMS o Geles al no adaptarse quedaron descartados. El segmento de Papel con el compuesto cumple una función tipo membrana, y que se le denominó FILM.

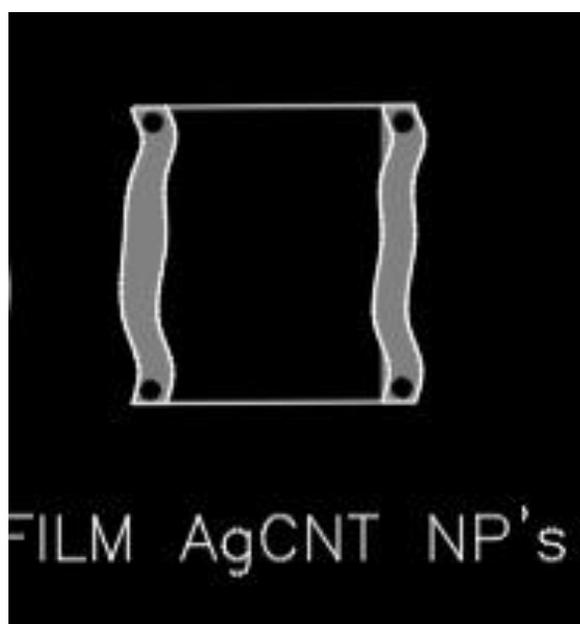


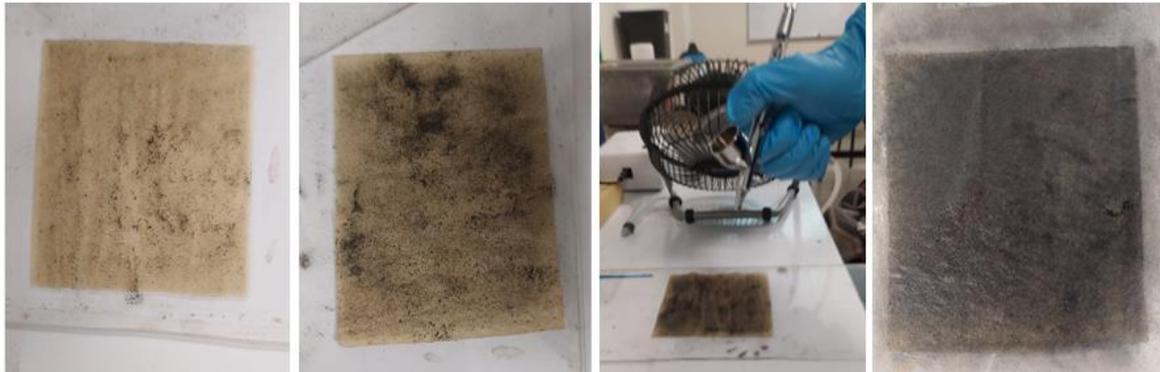
Figura 3.10 Esquema FILM utilizado como elemento sensor

La solución se vierte en un aerógrafo mediante el cual se deposita el compuesto en el FILM, las propiedades del FILM permiten la adherencia de la solución en la superficie sin permear el contenido.

### 3.4.2 Incorporación de SWCNT's- $AgNO_3$ NP's en el FILM

Mediante un aerógrafo, se deposita vía aérea el compuesto en el FILM. La incorporación del compuesto al FILM es similar a la aplicación de un barniz; a través de repetidas aplicaciones (manos o cargas) el FILM comienza a reunir en su superficie la solución que se concentra con cada

carga aplicada. Entonces el depósito del compuesto se realiza mediante capas superpuestas del compuesto en el elemento sensor (Figura 3.11).



*Figura 3.11 Depósito de SWCNT's-  $AgNO_3$  NP's en el FILM.*

### 3.5 Pruebas.

Se requieren aproximadamente 30ml de solución para obtener una capa distribuida uniformemente. El aerógrafo tiene una capacidad de 5ml por carga, por lo que tomaría 6 aplicaciones aproximadamente para obtener una adherencia uniforme sobre la superficie del FILM.

Posteriormente, se acondiciona el FILM colocando en un par opuesto de sus aristas terminales a base de aluminio que funjan como electrodos y que tendrán como función realizar la conexión al FILM para pruebas y mediciones eléctricas (Figura 3.12).

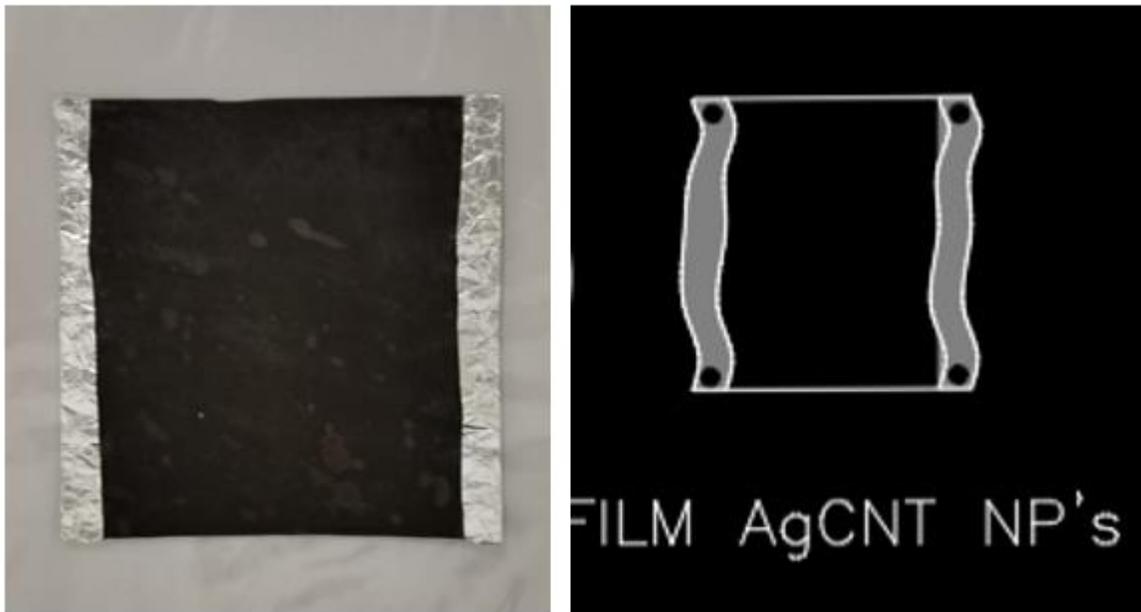


Figura 3.12 Acondicionamiento del FILM.

### 3.5.1 Prueba de resistencia eléctrica vs frecuencia

Una vez realizado el FILM dispersado uniformemente de la reducción elaborada, se procede a las pruebas iniciales. La premisa es la variación del valor de resistencia eléctrica ante un estímulo electromecánico. Para la primera prueba se realizó un estímulo puramente mecánico, esto fue, a través de un altavoz, el cual en sus terminales se colocan las terminales de un generador de ondas; con el cual se pretende barrer el espectro de frecuencias para determinar si esto produce un cambio en el valor de resistencia eléctrica, y de ser así, en que rango del espectro estas variaciones tienen mayor amplitud.

La prueba consiste en colocar el FILM sobre el altavoz quedando en contacto directo con el cono (Figura 3.13).

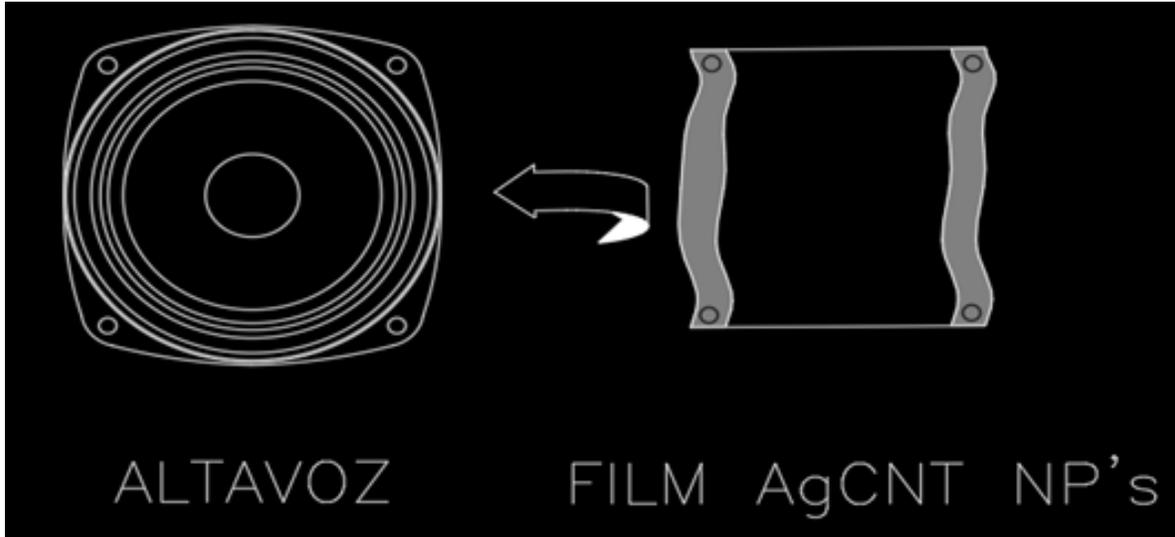


Figura 3.13. Esquemático Prueba Estimulo mecánico.

En la Figura 3.14 se muestra el circuito en que se realizó la medición.

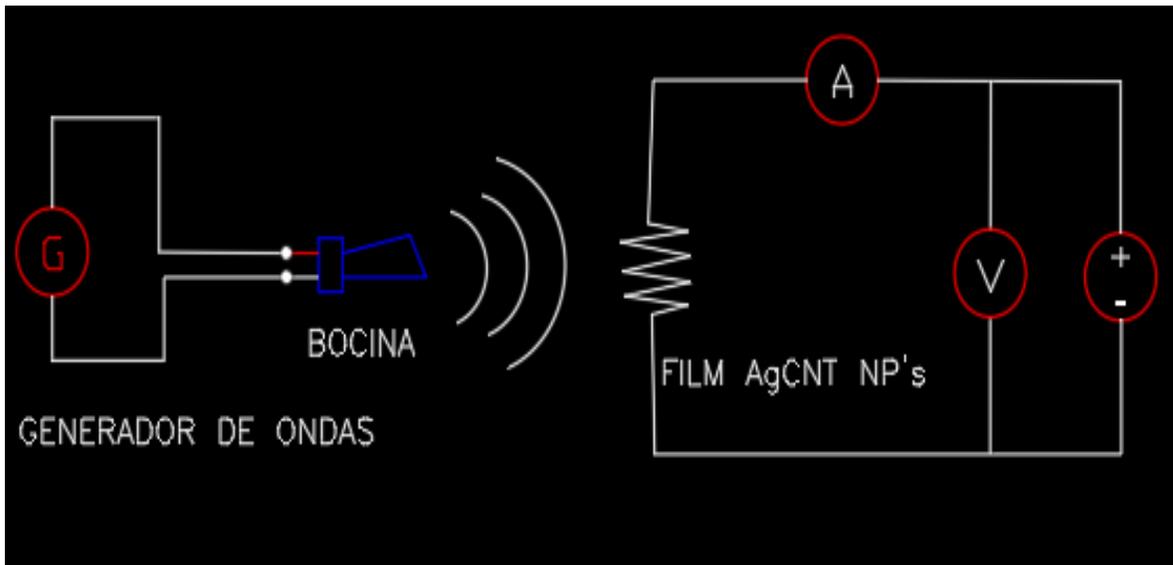


Figura 3.14 Circuito prueba Resistencia Vs Frecuencia

Se colocó el FILM sobre el altavoz, el cual se dispuso como si fuere e secundario de un transformador, siendo el generador y la señal una analogía de la inducción del primario. EN la Figura 3.15 se muestra el circuito de la prueba aplicado.

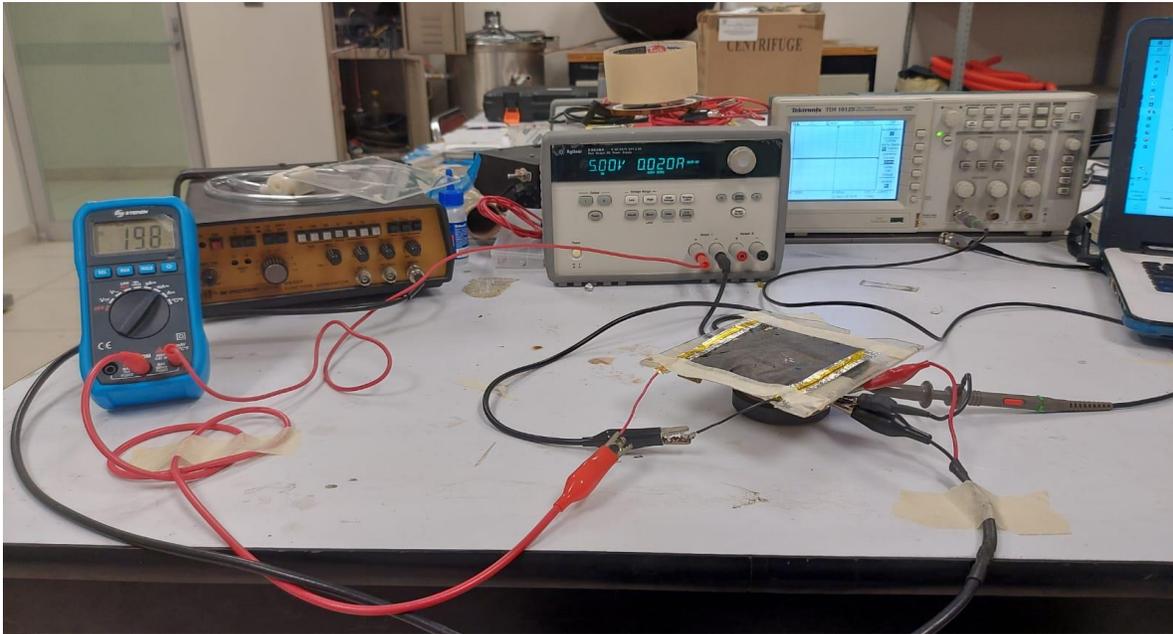


Figura 3.15 Circuito habilitado para prueba Resistencia vs Frecuencia

### 3.5.2 Prueba No.1 Flujo Forzado

Se determinó simular el Flujo de Savia mediante un modelo que pudiere representar el comportamiento pero con la opción de controlar las variables a modo.

La prueba se realizó bajo las siguientes consideraciones:

- I. Para la simulación del tejido leñoso se eligió un material tipo esponja buscando que sea permeable pero con cierta resistencia a ello.
- II. Se insertaron mangueras de poliuretano simulando los conductos hidroactivos.
- III. Se cubrió con papel película el modelo para evitar fugas y alteración en el sensor.
- IV. Se colocaron los sensores enrollados sobre la manguera a la entrada y salida del tejido del modelo, tratando de detectar un valor diferencial en la medición.

V. En la Figura 3.16 se muestra el modelo empleado.

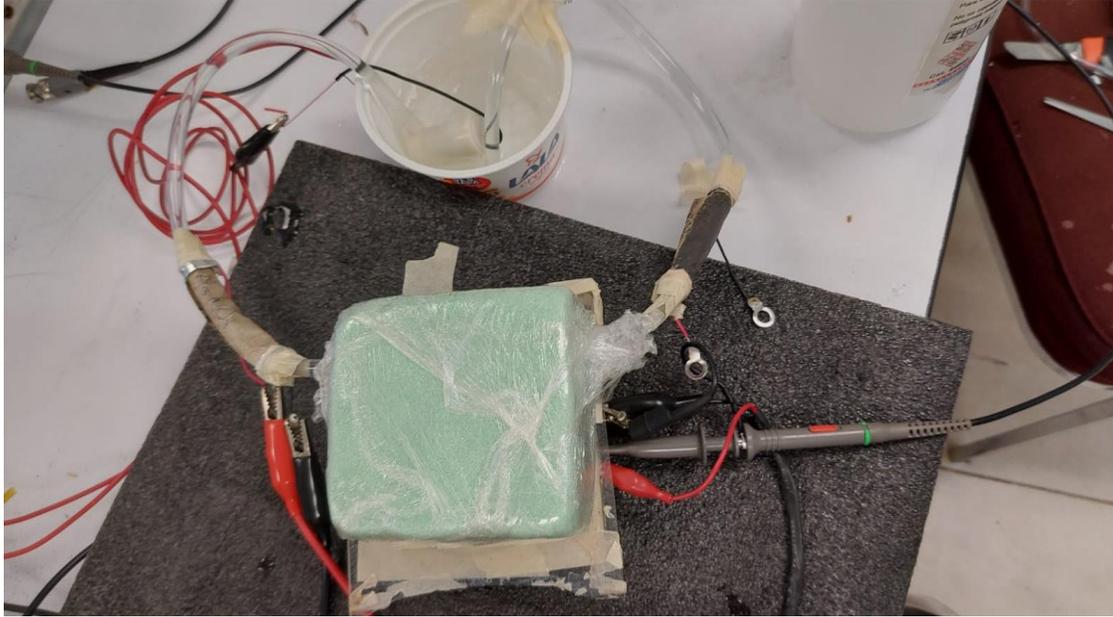
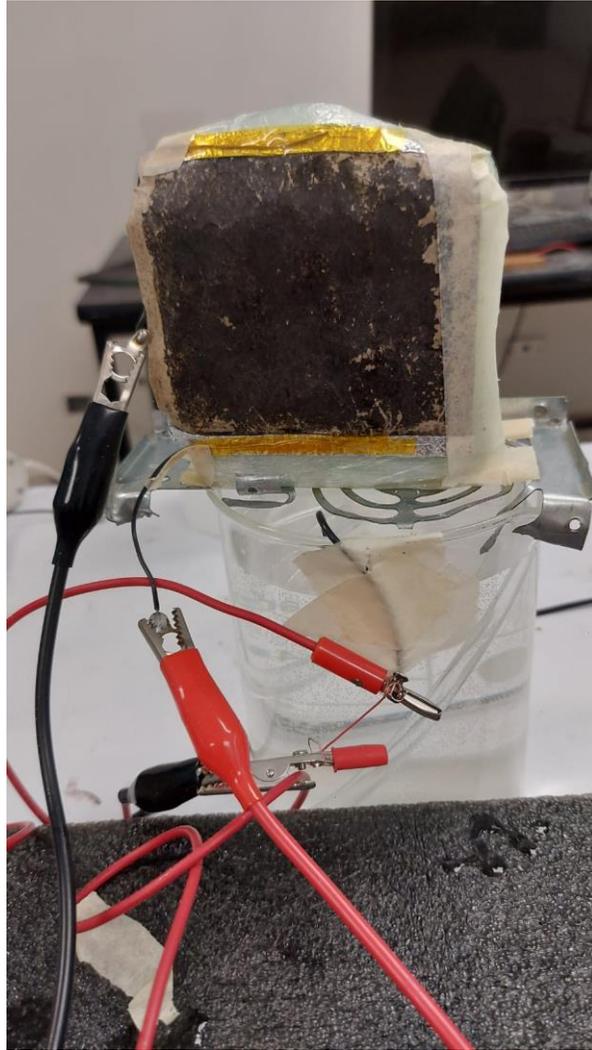


Figura .16 Modelo Prueba de Flujo Forzado No .1

### 3.5.3 Prueba No. 2 Flujo Forzado

Se realizó una segunda prueba, esta vez se realizó de la siguiente manera:

- I. Para la simulación del tejido leñoso se eligió un material tipo esponja buscando que sea permeable pero con cierta resistencia a ello.
- II. Se colocó la alimentación del Flujo por la parte superior del modelo, abasteciendo de agua y dejando correr por gravedad limitada únicamente por las características del material.
- III. Se cubrió con papel película el modelo para evitar fugas y alteración en el sensor.
- IV. Los sensores se colocaron directamente sobre el modelo del tejido, simulando el contacto directo con la parte exterior del tronco.



*Figura 3.17 Modelo Prueba Flujo Forzado No. 2*

### *3.5.2 Prueba No. 3: Detección de Variación de Flujo*

Se optó por una prueba utilizando dos sensores, simulando el primario y secundario de un transformador. Se dispusieron los FILM y se habilitaron en una de sus aristas un conductor a modo de electrodo para las pruebas. En la Figura 3.18 se muestra el modelo:



*Figura 3.18 Disposición de FILM Prueba No.3 Detección de variación de flujo forzado*

La Prueba se realizó de la siguiente manera:

- I. Para la simulación del tejido leñoso se eligió un material tipo esponja buscando que sea permeable pero con cierta resistencia a ello.
- II. Se colocó la alimentación del Flujo por la parte superior del modelo, abasteciendo de agua y dejando correr por gravedad limitada únicamente por las características del material.
- III. Se cubrió con papel película el modelo para evitar fugas y alteración en el sensor.
- IV. Los sensores se colocaron directamente sobre el modelo del tejido, simulando el contacto directo con la parte exterior del tronco.
- V. Los sensores se colocaron circundando el modelo, colocando el arista del electrodo para la medición y el otro extremo a unos 5 milímetros de distancia, simulando el entrehierro.

La prueba se muestra en la Figura 3.19.



*Figura 3.19 Modelo Prueba No. 3 Detección de Flujo de Savia*

## Capítulo 4 Resultados

Los resultados obtenidos en las mediciones, pruebas y ensayos se muestran a continuación.

### 4.1 Resultado Prueba Resistencia Eléctrica vs Frecuencia.

Para determinar si el sensor presentaba cambios en su valor de resistencia eléctrica se utilizó inicialmente un estímulo puramente mecánico.

Esta prueba se realizó utilizando 2 sensores con distintas concentraciones de nanomateriales, a su vez esta prueba sería un indicador la influencia de la concentración en la magnitud de las variaciones. El sensor 1 se aplicaron 10 mililitros del material mientras que al segundo de ellos se le aplicaron 15 ml.

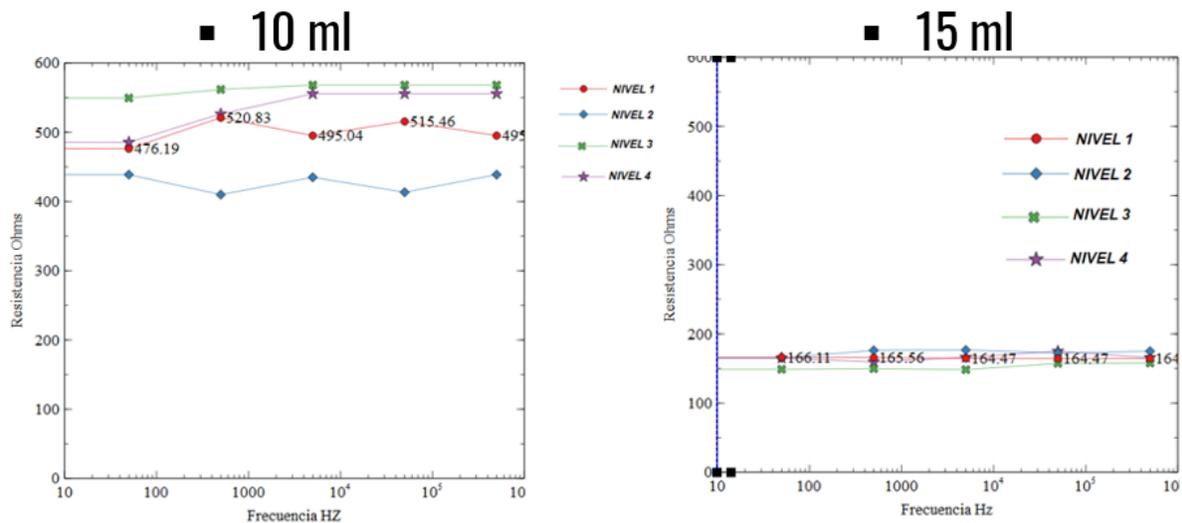


Figura 4.1 Resultados Prueba Resistencia Eléctrica vs Frecuencia (Ohms Vs Hz)

### 4.2 Resultado Prueba No.1 y No. 2 Flujo Forzado

Las pruebas realizadas para la detección de la variación en el flujo no arrojaron resultados perceptibles, por lo que estas pruebas más allá de lograr medir o indicar, fueron para descartar y ajustar la manera en que se estaba abordando el problema.

### 4.3 Resultados Prueba No. 3 Detección de Variación de Flujo.

La prueba que logró conceptualizar el principio estipulado fue la tercera, donde se acomodaron como el primario y secundario de un transformador.

Las sondas del osciloscopio estaban en la medición de la señal de entrada y la segunda sonda en la salida. Los puntos relevantes de esta prueba fueron:

- I. El primer indicador fue que el sensor del secundario logró replicar la señal del primario. Esta señal atenuada es una replica de la señal aplicada a la medición. Figura 4.1.
- II. Al incrementar paulatinamente el Flujo se logró detectar variaciones en la magnitud de voltaje pico del medidor, esta a su vez esta relacionada con el valor de resistencia eléctrica mediante la Ley de Ohm.
- III. El valor inicial del Voltaje Pico a Pico,  $V_{pp}$ , fue de 11.6Vpp, este valor incrementó a 12.8Vpp al realizar el flujo forzado. Figura 4.2
- IV. Concretamente, el valor de Voltaje Pico a Pico tuvo un incremento del 10.3%.

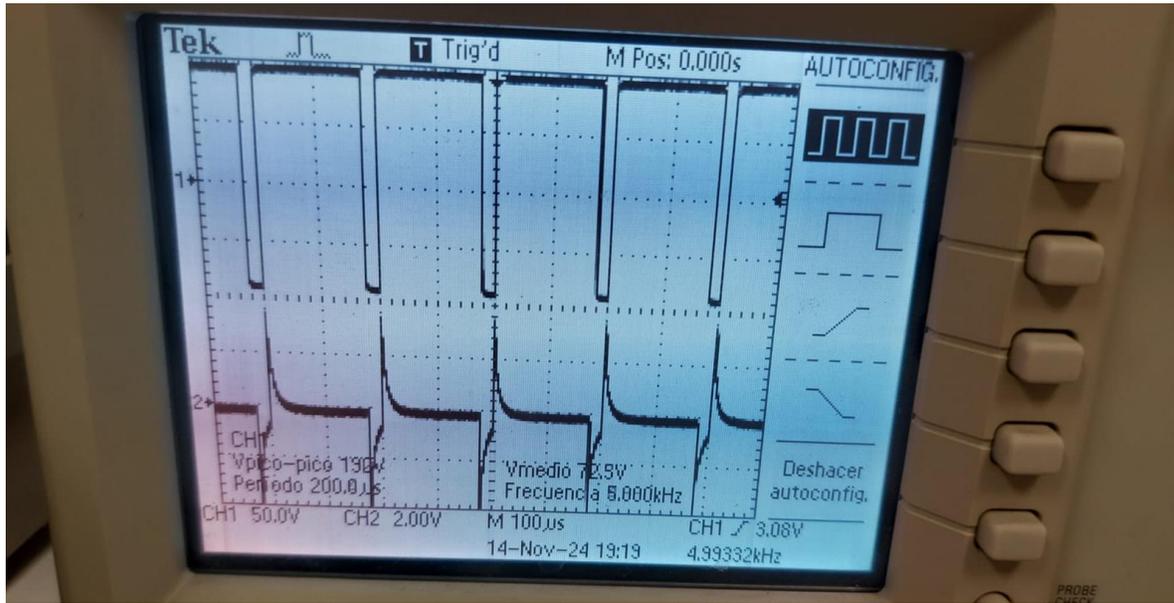


Figura 4.1 Resultado Prueba No 3. Replica de señal en el secundario.

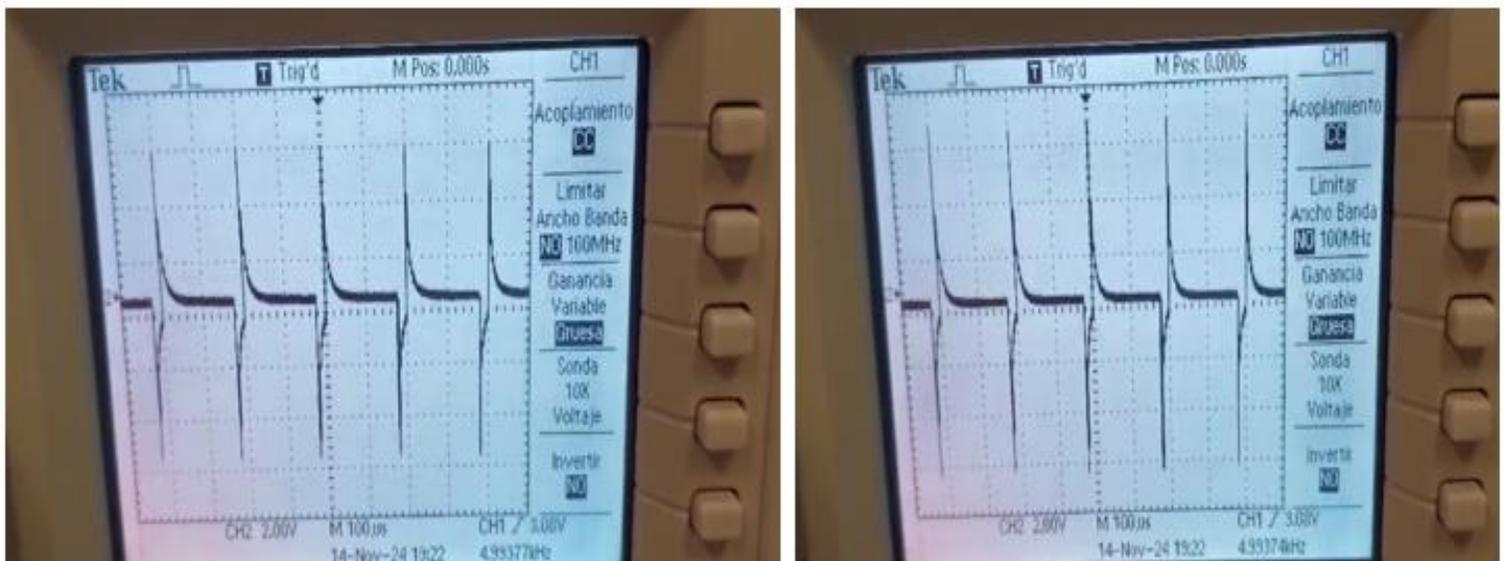


Figura 4.2 Resultado Prueba No. 3: Incremento del Valor de Voltaje Pico a Pico.

#### 4.4 Pruebas adicionales.

Para poder determinar la duración de la vida útil que tienen las propiedades del sensor se realizó el análisis en la medición de sus valores durante un periodo determinado, los resultados se muestran en la Figura 3.5.

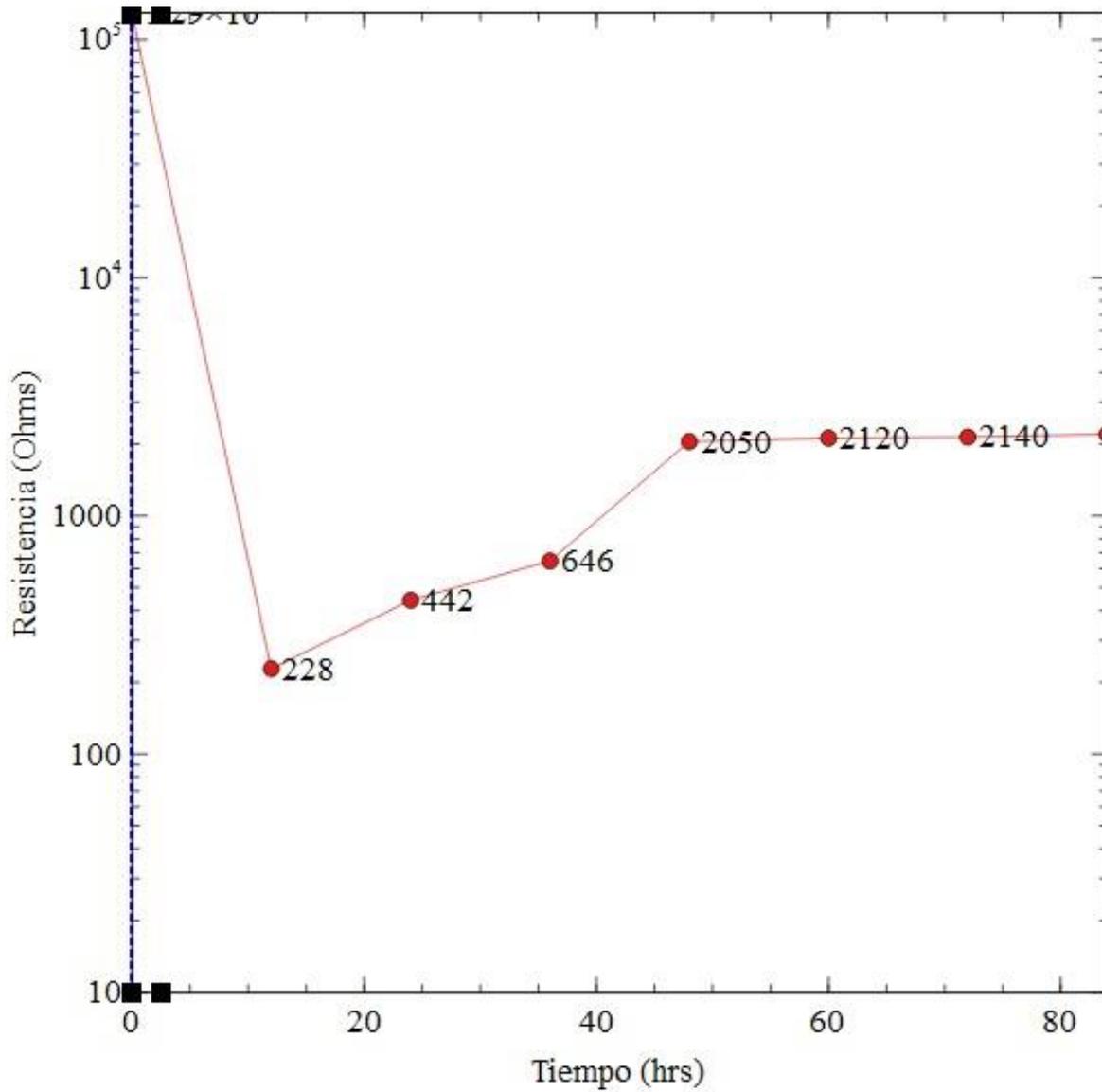


Figura 4.5 Resultados Prueba Resistencia Eléctrica vs Tiempo (Ohms vs Horas)

#### 4.5 Resultados Finales.

Con el desarrollo del presente, se logró la elaboración de un sensor fabricado a base de Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT's) y Nitrato de Plata:

- I. Este sensor es capaz de percibir cambios en su valor de resistencia eléctrica ante estímulos electromecánicos.
- II. El sensor genera distintos valores de respuesta a cambios en el espectro de la frecuencia del estímulo aplicado.
- III. El sensor logró detectar variaciones de Flujo en el modelo de simulación de Flujo de Savia con respuestas de 10.3% a razón de cambio.
- IV. El valor de resistencia eléctrica luego de un periodo de estabilización logra mantener su valor en reposo de forma constante

#### 4.6 Resultados de la investigación

Como resultado del trabajo generado se logró publicar un artículo de investigación en el Congreso Internacional para el Fortalecimiento de la Ciencia y la Investigación en 2023 en Durango, Dgo, haciendo la exposición del tema ante personal del Tecnológico Nacional de México.

El artículo se muestra a continuación.

## SISTEMA ELÉCTRICO ESTIMULADO POR VIBRACIÓN PARA ESTUDIO FISIOLÓGICO DE ÁRBOL DE MANZANO

MARCO ANTONIO DE LA CRUZ GONZÁLEZ<sup>1</sup>, JOSUE ORTÍZ MEDINA<sup>2</sup>, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA<sup>3</sup>

### RESUMEN

Debido a las propiedades mecánicas y electromecánicas de los nanotubos de carbono (CNT), han sido considerados para su aplicación en sistemas residenciales, comerciales, industriales y agrícolas, especialmente para estudio científico y de manejo de riegos, uso de agua y tasa de transpiración en plantas.

A través de la integración de CNT en el desarrollo de microsistemas en incremento, los sistemas nano electromecánicos (NEMS) han logrado crear sensores y desarrollar métodos y dispositivos para mediciones directas y confiables con las propiedades de los CNT (Hierold et al., 2007).

Se presenta un reporte como resultado de la implementación de un sistema de instrumentación, que permite analizar la respuesta que presentan los CNT ante un estímulo generado por ondas vibratorias en respuesta al valor de flujo de savia. Para lograrlo, fueron preparadas diferentes muestras de CNT sintetizadas con nanopartículas de plata (Ag-NP'S) con distintas concentraciones y dispersadas en un FILM con dimensiones de 10x10cm. Las muestras acondicionadas como membrana presentaron cambios en el valor de su resistencia eléctrica conforme su deformación mecánica y que está relacionada con el cambio del flujo de savia.

Los resultados muestran que existe una relación entre la concentración de los SWCNT-AgNP y el valor resistivo del FILM, haciéndolo susceptible a la estimulación por ondas vibratorias, con resultados de cambio a razón del 300%.

**Palabras clave:** nanotubos de carbono, nanopartículas de plata, nanosensor, sistema de instrumentación, medición de flujo de savia, xilema, floema

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. 14040906@itdurango.edu.mx

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. j.ortiz@itdurango.edu.mx

<sup>3</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. fgodinez@itdurango.edu.mx

## Capítulo 5 Referencias bibliográficas

- Alvarado Ortega, F. A., Martínez Rivera, J. A., Godinez Garcia, F. J., & Gamero-Inda, E. (2021). Sistema embebido para fitomonitorio de árboles de manzano. Congr. Int. En Ing. Electrónica. Mem. ELECTRO, 43, 150–155. <http://electro.itchiuhua.edu.mx/revista>
- Baker, J. M., & Nieber, J. L. (1989). An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. In *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 48).
- Boini, A., Bresilla, K., Perulli, G. D., Manfrini, L., Corelli Grappadelli, L., & Morandi, B. (2019). Photosensitive nets impact apple sap flow and fruit growth. *Agricultural Water Management*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105738>
- Catita, J.A.M. (2022). Challenges in Nanomaterial Characterization – From Definition to Analysis. In: Louro, H., Silva, M.J. (eds) *Nanotoxicology in Safety Assessment of Nanomaterials. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 1357. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-88071-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-88071-2_1)
- Cermák, J. (1973). A New Method of Sap Flow Rate Determination in Trees. In *Biologia Plantarum (PRAHA)* (Vol. 15, Issue 3).
- Chettri, P., Tripathi, A., & Tiwari, A. (2022). Effect of silver nanoparticles on electrical and magnetic properties of reduced graphene oxide. *Materials Research Bulletin*, 150, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111752>
- Cruiziat, P., Cochard, H., & Améglio, T. (2002). Hydraulic architecture of trees: Main concepts and results. In *Annals of Forest Science* (Vol. 59, Issue 7, pp. 723–752). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/forest:2002060>

Dix, M. J., & Aubrey, D. P. (2021). Calibration approach and range of observed sap flow influences transpiration estimates from thermal dissipation sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108534>

Fernández-Golfín Seco, J. I., Conde Garcia, M., Cabezas Martinez, J. A., Sánchez

Fernández, M. E., & Gyenge, J. E. (2010). *Técnicas en medición en ecofisiología vegetal : conceptos y procedimientos*. INTA.

Flo, V., Martínez-Vilalta, J., Steppe, K., Schuldt, B., & Poyatos, R. (2019). A synthesis of bias and uncertainty in sap flow methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.012>

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>

González-Altozano, P., Pavel, E. W., Oncins, J. A., Doltra, J., Cohen, M., Paço, T., Massai, R., & Castel, J. R. (2008). Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. *Agricultural Water Management*, 95(5), 503–515. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.11.008>

González, M., & Cervera Goy, M. T. (2020). *La madera: Conceptos clave para su identificación botánica*. (P. Torroba Balmori, Ed.). Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

Gendron, D., & Bubak, G. (2023). Carbon Nanotubes and Graphene Materials as Xenobiotics in Living Systems: Is There a Consensus on Their Safety? In *Journal of Xenobiotics* (Vol. 13, Issue 4, pp. 740–760). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jox13040047>

Green, S. R., Clothier, B. E., & Mcleod, D. J. (1997). The response of sap flow in apple roots to localised irrigation. In S.R. Green et al./Ap?cultural Water Management (Vol. 33, Issue 96).

Hierold, C., Jungen, A., Stampfer, C., & Helbling, T. (2007). Nano electromechanical sensors based on carbon nanotubes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 51–61.

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.02.007>

Hu, C., Liu, T., Neate, N., Fay, M., Hou, X., Grant, D., & Xu, F. (2022). Enhanced thermal and electrical properties by Ag nanoparticles decorated GO-CNT nanostructures in PEEK composites. *Composites Science and Technology*, 218, 109201.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109201>

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>

Jarvis, P. G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 273(927), 593–610. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>

Javid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Exploring the potential of nanosensors: A brief overview. *Sensors International*, 2, 100130.

<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100130>

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>

Kolb, K. J., Sperry, J. S., & Lamont, B. B. (1996). A method for measuring xylem hydraulic conductance and embolism in entire root and shoot systems. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 47, Issue 304). <https://academic.oup.com/jxb/article/47/11/1805/600410>

Mavani, K., & Shah, M. (n.d.). Synthesis of Silver Nanoparticles by using Sodium Borohydride as a Reducing Agent. [www.ijert.org](http://www.ijert.org)

Morton, D., Ghayvat, H., Mukhopadhyay, S. C., & Green, S. (2016). Sensors and instrumentation to measure Sap flow in small stem plants. 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016-July, 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2016.7520519>

Murjani, B. O., Kadu, P. S., Bansod, M., Vaidya, S. S., & Yadav, M. D. (2022). Carbon nanotubes in biomedical applications: current status, promises, and challenges. In *Carbon Letters* (Vol. 32, Issue 5, pp. 1207–1226). Springer. <https://doi.org/10.1007/s42823-022-00364-4>

Parnian, P. (2022). A Short Review on: Recent Advances in the Use of Carbon Nanotubes in Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites. *Macromolecular Symposia*, 405(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202100339>

Rahardjo, P. (1989). Soil water use by apple trees. [Tesis de maestría inédita]. Massey University.

L. Rivière, A. Lonjon, E. Dantras, C. Lacabanne, P. Olivier, N.R. Gleizes, Silver fillers aspect ratio influence on electrical and thermal conductivity in PEEK/Ag nanocomposites, *Eur. Polym. J.* 85 (2016) 115–125.

Ren, R., Liu, G., Wen, M., Horton, R., Li, B., & Si, B. (2017). The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.009>

Sadr, S., Lotfalizadeh, N., Ghafouri, S. A., Delrobaei, M., Komeili, N., & Hajjafari, A. (2023). Nanotechnology innovations for increasing the productivity of poultry and the prospective of nanobiosensors. In *Veterinary Medicine and Science* (Vol. 9, Issue 5, pp. 2118–2131). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/vms3.1193>

Smith, D. M., & Allen, S. J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(305), 1833–1844. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.12.1833>

Swanson RH. 1983. Numerical and experimental analysis of implanted-probe heat pulse velocity theory. Edmonton, Alberta, Canada: PhD thesis. University of Alberta

Sun, X., Li, J., Cameron, D., & Moore, G. (2022). On the Use of Sap Flow Measurements to Assess the Water Requirements of Three Australian Native Tree Species. *Agronomy*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy12010052>

Zhang, S., Zhang, H., Yao, G., Liao, F., Gao, M., Huang, Z., Li, K., & Lin, Y. (2015). Highly stretchable, sensitive, and flexible strain sensors based on silver nanoparticles/carbon nanotubes composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 652, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.187>