



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

TOMOGRAFÍA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTA PARA LA  
DETERMINACIÓN DE MADUREZ DEL MANGO (*Mangifera indica* L.)

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:  
Alan Medina Zepeda

Dirigido por:  
Dra. Marcela Gaytán Martínez

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Junio de 2021



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

TOMOGRAFÍA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTA PARA LA  
DETERMINACIÓN DE MADUREZ DEL MANGO (*Mangifera indica* L.)

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

**Presenta:**

Ing. Alan Medina Zepeda

Dirigido por:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Dra. Marcela Gaytán Martínez  
Presidente

Dr. Miguel Ángel San Pablo Juárez  
Secretario

Dr. Alberto Pastrana Palma  
Vocal

Dr. Eduardo Morales Sánchez  
Suplente

Mtro. Javier García Pérez  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Junio de 2021

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

*El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de esta etapa académica y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a las instituciones que han hecho posible la realización del trabajo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la ayuda económica brindada. A la Universidad Autónoma de Querétaro por la oportunidad de estudiar un posgrado y la beca otorgada. También al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro por haberme abierto las puertas a sus instalaciones.

Muy especialmente a mi directora de tesis, a la Dra. Marcela Gaytán Martínez, por la acertada orientación, el soporte y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento en el trabajo realizado, y que esta tesis llegara a buen término. También agradecer a todos los docentes que me acompañaron durante la maestría con todas sus enseñanzas, gracias a ellos crecí personal y profesionalmente. A mis compañeros con quienes conviví y compartí excelentes momentos.

Finalmente, agradezco a mi familia por su comprensión, comunicación constante y apoyo. De manera muy especial a mi novia quien ha estado a mi lado compartiendo mis alegrías y angustias, por el estímulo para que me supere día con día, el apoyo incondicional y la ayuda de siempre. En ella encontré las fuerzas necesarias para llegar hasta el final. Esta tesis va dedicada a ella.

## TABLA DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN .....	3
II.	ANTECEDENTES .....	6
	2.1 CALIDAD DEL MANGO Y SU MEDICIÓN .....	6
	2.4 TOMOGRAFÍA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA .....	9
	2.4.1 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA ELÉCTRICA .....	12
	2.5 MEDIDOR LCR DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA .....	13
	2.5.2 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA EN EL MANGO .....	14
	2.6 HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS .....	16
	2.6.1 Análisis $R$ y $R$ .....	16
	2.6.2 Correlación de Pearson .....	17
III.	HIPÓTESIS .....	18
IV.	OBJETIVOS .....	18
	4.1 OBJETIVO GENERAL: .....	18
	4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	18
V.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
	5.1 MATERIALES .....	19
	5.2 ESQUEMA GENERAL DE INVESTIGACIÓN .....	19
	5.2.1 Análisis $R$ y $R$ del sistema de medición de impedancia eléctrica en un mango. ....	20
	5.2.2 Propiedades eléctricas del mango a través del tiempo .....	22
	5.3 DISEÑO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	24
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	25
	6.1 Estudio $R$ y $R$ del sistema de medición de impedancia eléctrica en un mango. ....	25
	6.2 MEDICIONES DEL MANGO A TRAVÉS DEL TIEMPO .....	27
	6.2.1 Impedancia eléctrica de los mangos a través del tiempo .....	27
	6.2.2 Tomografía de impedancia eléctrica de los mangos a través del tiempo .....	32
	6.3 RELACIÓN ENTRE IMPEDANCIA ELÉCTRICA DEL MANGO Y LOS SÓLIDOS SOLUBLES .....	33
VII.	CONCLUSIONES .....	37

**VIII. REFERENCIAS .....38**

**IX. ANEXOS.....43**

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aceptabilidad de un sistema de medición según la AIAG.....	16
Tabla 2. Análisis de la varianza del estudio R y R del método de medición de impedancia.....	25
Tabla 3. Análisis de la varianza reducido del estudio R y R del método de medición de impedancia .....	25
Tabla 4. Evaluación del sistema de medición de impedancia.....	26
Tabla 5. Impedancia eléctrica de los mangos a través del tiempo.....	28
Tabla 6. Valores de impedancia y sólidos solubles totales.....	33

Dirección General de Bibliotecas de la UAO

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características del mango en relación con su madurez. ....	7
Figura 2. Escala de color CIELAB .....	8
Figura 3. Medidor LCR Hioki serie 3522 .....	13
Figura 4. Configuración de la inyección de corriente y medición de potencial en TIE.....	15
Figura 5. Esquema general de investigación.....	20
Figura 6. Configuración de la conexión de los electrodos en el mango al medidor de impedancia. ....	21
Figura 7. Inyección adyacente. Medición a 4 puntas con el medidor de impedancias. ....	22
Figura 8. Refractómetro. ....	23
Figura 9. Componentes de variación del análisis R y R del método de medición de impedancia. ....	26
Figura 10. Interacción entre operadores y muestras del sistema de medición de impedancia. ....	27
Figura 11. Cambios en la impedancia eléctrica del mango respecto con el tiempo de maduración.....	29
Figura 12. Comportamiento del mango 1 ajustado cuadráticamente .....	30
Figura 13. Comportamiento del mango 2 ajustado cuadráticamente .....	30
Figura 14. Comportamiento del mango 3 ajustado cuadráticamente .....	31
Figura 15. Tomografía de impedancia eléctrica a través del tiempo. ....	32
Figura 16. Impedancia eléctrica y sólidos solubles del mango a través del tiempo.....	34
Figura 17. Correlación de los sólidos solubles con la impedancia eléctrica.....	35

## RESUMEN

El mango es una fruta climatérica senescente que presenta varias etapas de maduración. Una forma de determinar el grado de maduración del mango es por la medición de sólidos solubles, sin embargo, es una prueba destructiva. Otra forma alternativa de obtener información del interior de un cuerpo biológico, como de frutas o verduras, es a través de sus propiedades dieléctricas, como la impedancia eléctrica, la cual está presente en todos los tejidos orgánicos. El análisis de impedancia eléctrica es una técnica que no conlleva a la modificación física o química del cuerpo a analizar. Esta investigación propone un método para medir la tomografía impedancia eléctrica para determinar la madurez del mango. Para ello el objetivo fue mostrar la correlación existente entre la medición de impedancia eléctrica del mango, la medición de sólidos solubles y el grado de madurez del mango. Para lograr el objetivo, primero fue necesario determinar la confiabilidad del sistema de medición con la aplicación de un análisis R y R, posteriormente se evaluó la relación de las propiedades eléctricas con el mango, para determinar si existe correlación entre la impedancia y los sólidos solubles totales. Se encontró una clara tendencia en las mediciones de las propiedades eléctricas conforme transcurre el tiempo. Las mediciones de impedancia con los sólidos solubles mostraron una correlación del 72%. Dado esto se puede concluir que la impedancia eléctrica del mango tiene una alta relación con la madurez del mango.

**Palabras clave:** Mango, impedancia eléctrica, sólidos solubles, madurez, correlación de Pearson, tomografía.

## ABSTRACT

Mango is a senescent climacteric fruit that presents various stages of ripening. One way to determine the degree of ripeness of the mango is by measuring soluble solids. However, it is a destructive test. Another alternative way of obtaining information from the interior of a biological body, such as fruits or vegetables, is through its dielectric properties, such as electrical impedance, present in all organic tissues. The electrical impedance analysis is a technique that does not lead to the physical or chemical modification of the body to be analyzed. This research proposes a method to measure electrical impedance tomography to determine mango ripeness. It is proposed to show the correlation between the measurement of the mango's electrical impedance, the measurement of soluble solids, and the mango's degree of maturity. To achieve the objective, it was first necessary to determine the reliability of the measurement system using an R and R analysis. Later, the electrical properties' relationship with the handle was evaluated to determine if there is a correlation between impedance and soluble solids totals. A clear trend was found in the electrical properties' measurements over time, and impedance measurements were also compared with soluble solids, and their correlation was 72%. Given this, it can be concluded that the impedance of the mango has a high relationship with the ripeness of the mango.

**Key words:** Electric impedance, soluble solids, mango maturity, correlation, tomography.

## I. INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica L.*) es una fruta tropical de gran importancia agrícola, su comercialización es, principalmente, como un producto fresco y recién cortado, pero también como una gran diversidad de alimentos procesados (Santos et al., 2015). Su manipulación, transporte y almacenamiento trae consigo problemas para la calidad de la fruta, ya que estos factores pueden influir en el deterioro bioquímico y fisiológico (Properties, 2005; Neto et al., 2017). Las frutas tropicales, como los mangos, son más perecederos que las de clima templado como la manzana y el durazno, por lo que es importante conocer su maduración (Ducamp-Collin et al., 2009).

El tema de la madurez del mango es relevante, pues a pesar de ser una fruta muy demandada, su alta producción es limitada por su comercialización, ya que tiene una vida reducida en anaquel, debido a su vulnerabilidad a altas o bajas temperaturas, y a agentes patógenos (Castelo, 2005).

Asegurar la calidad del mango, es importante para la industria pues en el 2016 México fue el quinto productor mundial de mango, con un volumen de 1.88 millones de toneladas, de las cuales 1.55 fueron para consumo nacional y lo restante para exportación. Uno de cada 25 mangos consumidos en el mundo, es mexicano. Estimaciones del gobierno de México afirman que la tendencia de exportaciones va en aumento (Sagarpa, 2017).

Para cualquier producto que se pretenda exportar, la calidad muestra el grado de excelencia de un producto, y en términos de alimentos define las características para su grado de aceptación, basado en sus propiedades fisicoquímicas, sensoriales y valor nutricional. Las frutas y verduras con cualidades sensoriales y nutricionales superiores tienen un mayor valor económico (Gopalan et al., 2017). Sin embargo, una de las principales características que debe tener una fruta de calidad es un grado óptimo de madurez tanto físico como organoléptico (Gonzalez, 2014).

Los estándares de calidad internacionales se fundamentan en dos índices; el de cosecha, que se basa en el color superficial, y el de calidad, que se basa en diversos factores internos y externos (Gonzalez, 2014). Los factores externos para considerar son tamaño, forma, color, brillo, firmeza, textura, y ausencia de defectos visibles, como manchas, opacidad, etc. Los factores internos se toman en cuenta son sólidos solubles, acidez, grasa, pigmentos, color, materia seca, pectinas, entre otros (Gopalan et al., 2017).

Los métodos comunes para la investigación de la madurez de las frutas están limitados por factores como el tiempo de procesamiento y la naturaleza destructiva. Estos métodos suelen ser laboriosos y requieren acceso a instalaciones de laboratorio, por lo que resultan ser costosos e inviables para una inspección cotidiana (Islam et al., 2018).

La medición de impedancia eléctrica sobre cuerpos biológicos tiene como ventaja no modificar física o químicamente los tejidos, a diferencia de otros procedimientos que son destructivos y costosos. Esto ha hecho que la medición de impedancia eléctrica se haya vuelto un tema importante para el conocimiento interno de frutas.

La técnica para generar tomografías de impedancia aplicada al mango es todavía una prueba de laboratorio, esto se puede deber a la poca investigación que existe al respecto, por lo que falta mucho para industrializarse. De acuerdo a National Mango Board (2015) existen diferentes formas de determinar la madurez del mango, por ejemplo, evaluando su color, su firmeza y los sólidos solubles ( $^{\circ}$  Brix), sin embargo, el método de la impedancia podría ser uno muy útil, puesto que es un procedimiento que se puede llevar a cabo sin dañar la fruta.

Como se ha visto, el cultivo del mango es muy importante para la sociedad, pues tiene un impacto relevante en la exportación y la economía del país, por lo que es necesario fortalecer la vinculación entre la parte académica y productiva, con el fin de generar nuevas tecnologías que incrementen el valor agregado de este producto. En este caso, se propone una alternativa para medir la madurez del mango, pero que no sea destructiva. La cuál puede ser útil para la industria alimenticia pues es una herramienta que sirve para conocer mejor la

mercancía de los productores, lo cuál puede ser ventajoso para planear mejor los sistemas logísticos de este producto.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Calidad del mango y su medición.

El mango, llamado científicamente *Mangifera Indica L*, es una de las frutas tropicales que más ha crecido en cuanto a producción y demanda, para consumo nacional y exportación. Esta fruta presenta alta vulnerabilidad a temperaturas extremas y agentes patógenos, lo que vuelve importante el conocimiento de su madurez.

Cuando las frutas son cosechadas, éstas siguen con los procesos fisiológicos, un ejemplo de ello es la respiración, que es uno de sus procesos que más influye en la maduración. El manejo de estos productos, una vez cosechados, consiste básicamente en el control de factores como la exposición al aire y temperatura, los cuales influyen en su madurez (González, 2014). Los métodos para evaluar la maduración se pueden distinguir entre destructivos y no destructivos.

### 2.2. Métodos de medición de madurez destructivos

#### 2.2.1 Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles, también son conocidos como sólidos solubles (unidad de niveles de azúcar disuelta en un líquido), tienen una relación con la madurez del mango y son un método destructivo, ya que para medirlos es necesario colocar un pedazo de pulpa de mango en el cristal de un refractómetro, la dispersión de la luz se correlacionará con la cantidad de grados Brix de la fruta a través del ocular. Mientras un mango madure tendrá un mayor contenido de sólidos solubles (° Brix) y una menor firmeza. En la Figura 1 se muestra la equivalencia de sólidos solubles (° Brix) y madurez del mango.

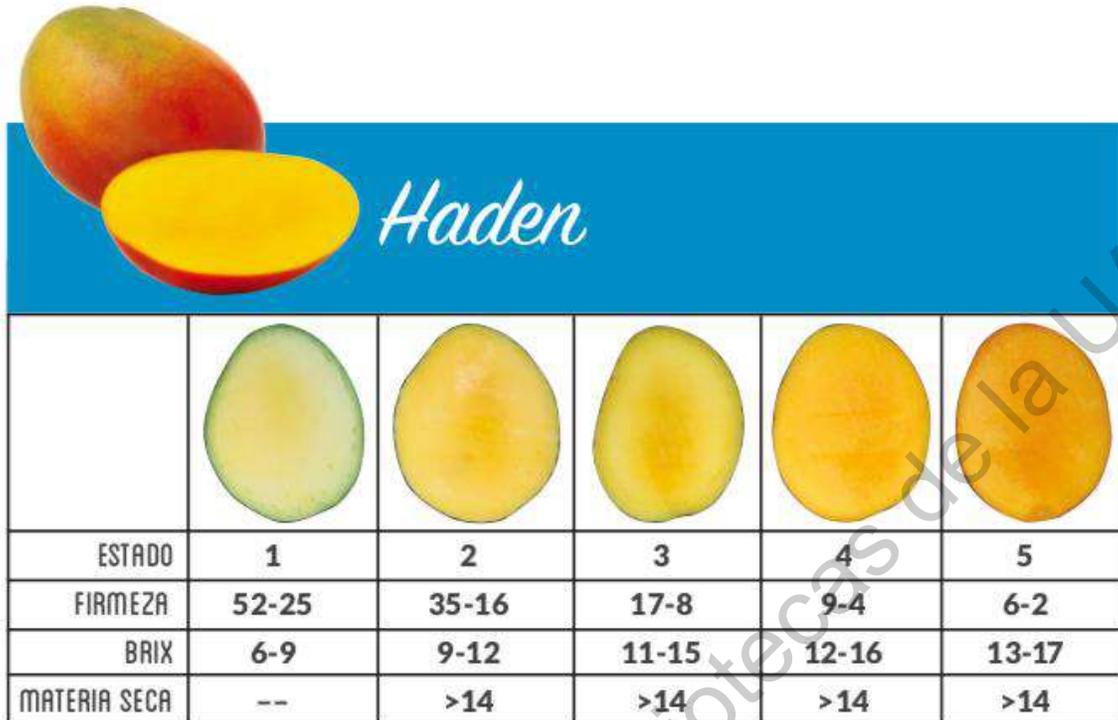


Figura 1. Características del mango en relación con su madurez.

Fuente: [www.mango.org](http://www.mango.org)

### 2.2.2. Color

Para determinar la madurez del mango se pueden utilizar los parámetros de color, los que se miden con un colorímetro. Primeramente, es necesario moler el mango, con el fin de homogenizar la muestra. Después se coloca parte de la muestra en una caja Petri. Se toman lecturas en los puntos Norte, Sur, Este, Oeste y centro de la caja. Como resultados se obtienen los valores de luminosidad L con una escala de 0 (negro) a 100 (blanco). Así como la descomposición de la luz en colores básicos: la escala "a" que va del rojo al verde y la "b" del amarillo al azul (Zepeda y Martínez, 2020).

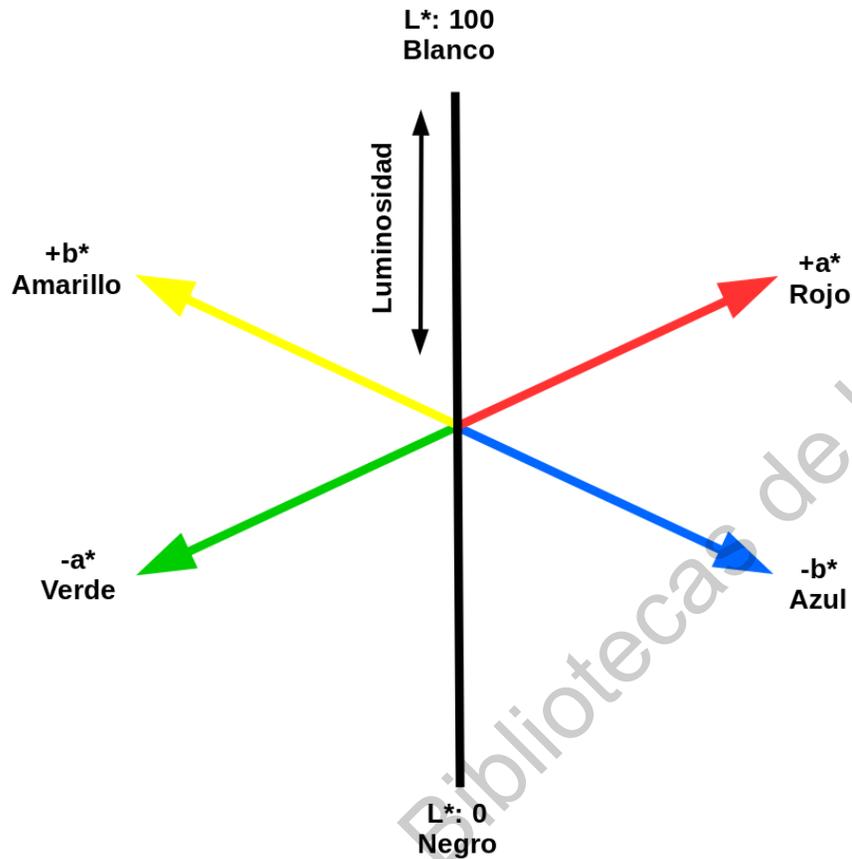


Figura 2. Escala de color CIELAB

Fuente: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

### 2.2.3 Firmeza

La medición de firmeza se ha utilizado como índice de madurez en diversas frutas, pero no siempre los parámetros están correlacionados con la calidad óptima de estas, sin embargo, se ha considerado como un indicador confiable de la madurez del mango en las etapas de cosecha y madurez durante su manejo comercial (Padda et al., 2011; Blanes et al., 2015). Actualmente, los sistemas no destructivos para la clasificación de firmeza de la fruta se basan en la respuesta a la aceleración o a la señal acústica resultante de un impacto elástico de poca energía (Schouten et al., 2018).

## **2.3 Métodos de medición de madurez no destructivos**

### **2.3.1 Aroma**

Un método para determinar la madurez del mango es evaluando su aroma. De acuerdo con Slaughter (2009), entre más fuerte sea su olor, más elevada es su madurez. En la década de los 90s se desarrolló un dispositivo llamado Nariz Electrónica (E-nose) adaptada a un cromatógrafo de gases. que ofrece una alternativa rápida y no destructiva para percibir el aroma, y, por lo tanto, podría utilizarse de manera ventajosa para predecir la fecha optima de cosecha. Comercialmente utilizan una serie de sensores combinados con software de reconocimiento de patrones, era capaz de percibir materia volátil y fue utilizado para monitorear diversas frutas, tales como manzana (Brezmes et al., 2001), plátano (Llobet et al., 1999), arándano (Simon et al., 1996), mandarina (Gómez et al., 2007), durazno (Benedetti et al., 2008) y tomate (Hern et al., 2006).

### **2.3.2. Impedancia eléctrica**

La impedancia eléctrica se usa en material biológico, mediante la inyección de voltaje, se puede conseguir información acerca de cambios físicos y químicos de los tejidos. Esta técnica ha sido utilizada en varias frutas, por ejemplo, fresa, kiwi, pepino, manzana, etc. (Gonzalez, 2014). También, ha sido usada esta propiedad para determinar la densidad ósea, utilizando la Tomografía de impedancia eléctrica, la cual genera mapas de conductividad eléctrica del material ósea (San-Pablo-Juárez *et al.*, 2017). Por lo que podría ser una alternativa para determinar la madurez del mango.

## **2.4 Tomografía de impedancia eléctrica**

La tomografía de impedancia eléctrica en un material biológico consiste en la aplicación de corriente eléctrica para realizar una serie de mediciones con un determinado rango de frecuencias que, a través de un software, recrea imágenes del comportamiento de la electricidad inducida, relacionadas con su composición. Con esta técnica es posible ver los

cambios fisiológicos dentro y fuera, así como los tejidos y membranas del cuerpo biológico, siendo este un método simple y no destructivo (Gonzalez, 2014).

El análisis de impedancia eléctrica es una técnica que no conlleva la modificación física o química del cuerpo a analizar y se ha aplicado en varios campos de investigación, también se le conoce como Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIS). Ésta se ha utilizado ampliamente en agricultura (Hajimorad et al., 2016), fisiología vegetal (Scientific et al., 2018), e ingeniería de alimentos para el estudio de frutas como el plátano (Chowdhury et al., 2016), la fresa (González-Araiza, *et al.*, 2016), el aguacate (Islam et al., 2018), cítricos (Chowdhury et al., 2017), entre otros. El cambio en la composición química, anatómica y fisiológica de un tejido biológico hace que la bioimpedancia y otras propiedades eléctricas también cambien (Hafezi y Kundu, 2018).

Existen diversos equipos para medir impedancia eléctrica, desde unos muy sofisticados con monitor de gráficas, con alta sensibilidad y más funciones hasta otros más austeros con pantalla LCD monocromática, menos sensibles y con funciones más limitadas. Se han realizado mediciones de impedancia eléctrica para simular tomografías en frutos como el mangostán, obteniendo resultados exitosos, utilizando un medidor LCR Hioki (gama media), el cual también puede funcionar para experimentar con el mango. Para medir los niveles de las variables en juego se ajustaron contemplando la humedad de la fruta y la saturación de las imágenes que se estaban generando (Nakawajana et al., 2016).

Según Kovalyshyn *et al.* (2013) las propiedades eléctricas de materiales biológicos pueden medirse mediante diversos métodos y pueden utilizarse en una amplia gama de disciplinas e industrias. La oposición al paso de corriente alterna, denominada reactancia, y la resistencia son características propias de la impedancia eléctrica, se toman como función de la frecuencia y, de acuerdo con el procedimiento de medición, los datos de la impedancia eléctrica se registran mediante una computadora, en un software, para su análisis. Es aquí donde se genera la imagen una vez que los datos obtenidos de las mediciones se hayan insertado y

ejecutado en el programa (Nakawajana et al., 2016). Este método se puede utilizar para la medición de la madurez del mango.

Desde un enfoque macroscópico los materiales biológicos son considerados dieléctricos no homogéneos, sin embargo, desde un punto de vista microscópico, la célula es conductora debido a que existe una conectividad iónica en el contenido de soluciones orgánicas, por tanto, las membranas celulares no se consideran conductoras, ya que la densidad, la dispersión estructural de las células y las propiedades de cada tipo de tejido influyen en las propiedades eléctricas de los tejidos (Kertész et al., 2015).

La temperatura, porosidad y densidad son factores que afectan en la medición de impedancia eléctrica del material biológico, sin embargo, la presencia de agua, la diferencia de energía en cada tejido y la propiedad de sorción son los factores más significativos a contemplar durante una medición (Hlaváčová, 2003). Las propiedades eléctricas de los materiales biológicos se pueden medir por varios métodos y se pueden usar en una amplia gama de disciplinas e industrias (Venkatesh y Engineering, 2005; Miclaus y Morega, 2010; Jha et al., 2011; Kovalyshyn et al., 2013; Paszkowski et al., 2014).

Debido a que la impedancia eléctrica es una propiedad eléctrica del mango (Neto et al., 2017), se encuentra este proyecto como un área importante de investigación pues es una característica física que nos podría servir para determinar la madurez, sin tener que dañar por invasión la fruta.

En una gran variedad de problemas de tipo biológico, fisiológico y médico la impedancia eléctrica ha sido aplicada como principio de transducción. Por lo que es importante explicar algunos conceptos básicos sobre lo que es la impedancia eléctrica.

### 2.4.1 Parámetros que influyen en la determinación de la impedancia eléctrica

La resistencia eléctrica se conoce como la habilidad de un elemento de un circuito para resistir el flujo de corriente eléctrica. La ley de Ohm define esta resistencia como la relación que existe entre la tensión y la corriente:

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

Donde:

- $R$  significa el valor de la resistencia eléctrica
- $V$  significa el valor de la tensión eléctrica
- $I$  representa el valor de la corriente eléctrica

Esta fórmula solo se puede utilizar cuando 1) se cumple con la ley de Ohm en todos los niveles de tensión y corriente, 2) su valor de resistencia es independiente de la frecuencia y 3) las señales de tensión y corriente a través de un resistor están en fase, básicamente solo cuando la corriente es directa o cuando el dispositivo en un circuito de corriente alterna no presenta reactancia capacitiva o inductiva (Nardo Ramírez *et al.*, 2013).

Para comprender la complejidad de la impedancia eléctrica también debemos tomar en cuenta la capacitancia, la cual representa la habilidad para conservar carga eléctrica. Este atributo establece que la relación que hay entre la tensión existente a través de las placas del capacitor y la carga eléctrica almacenada en este, por medio de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{V}{Q}$$

Donde:

- $C$  es la capacitancia, la cual se mide en faradios
- $V$  es la tensión
- $Q$  es la carga eléctrica almacenada, medida en coulombios.

A diferencia de la resistencia, la conductancia representa la facilidad que ofrece un material cualquiera al paso de corriente, o sea, son inversamente proporcionales.

La bioimpedancia se determina mediante un cálculo complejo que varía de acuerdo con la composición del tejido y la frecuencia de la señal aplicada (Islam et al., 2018). Por lo tanto, la bioimpedancia depende directamente de la frecuencia, y esta se puede representar de la siguiente manera:

$$Z_b(\omega) = \text{Re}(Z(\omega)) - j\text{Im}(Z(\omega)) = R_b(\omega) - jX_b(\omega),$$

Donde:

- $R_b(\omega)$  representa la magnitud de la parte real del complejo  $Z_b(\omega)$
- $X_b(\omega)$  la magnitud de la parte imaginaria

## 2.5 Medidor LCR de impedancia eléctrica

Los medidores LCR o analizadores de impedancia eléctrica son instrumentos usados para mediciones de parámetros primarios y secundarios de impedancia (inductancia, capacitancia y resistencia) para caracterizar componentes eléctricos pasivos y materiales. El dispositivo que se muestra en la Figura 3 es el que utilizaremos para realizar las mediciones de impedancia eléctrica.



Figura 3. Medidor LCR Hioki serie 3522

Fuente: hioki.com

Las características relevantes de un medidor de LCR, son: rango de inductancia, rango de capacitancia y rango de resistencia. Para la impedancia eléctrica son: precisión, frecuencia de prueba, medida de parámetros, prueba de tensión y corriente de prueba. La recopilación de datos y la automatización se hace fácil con una amplia variedad de interfaces tales como las que están disponibles en la mayoría de los Medidores LCR. Un medidor de LCR debe tener la flexibilidad para medir varios parámetros de impedancia eléctrica sobre una amplia gama de frecuencias y voltajes.

La tomografía de impedancia eléctrica (EIT, por sus siglas en inglés) es un método de obtención de imágenes, a bajo costo, no implica radiación y puede crear desde una imagen simple de corte, hasta imágenes en tiempo real. Estas características hacen que el método adecuado hasta para diagnósticos o para obtener imágenes en tiempo real durante una operación intraoperatoria, sin embargo, la baja calidad de la imagen que se genera en comparación con otros métodos de tomografía aún impide que la EIT se aplique ampliamente en el diagnóstico y la orientación médica. Debido a esto se cree que pueda utilizar en frutas para determinar su nivel de madurez aprovechando la sencillez del método y su bajo costo (Borsoi et al., 2018).

### **2.5.2 Aplicación de la técnica en el mango**

Para medir de manera homogénea y representativa el mango, se propone medir la impedancia eléctrica con la metodología de Tomografía de impedancia eléctrica propuesta por San-Pablo-Juárez *et al.*, (2017), la cual es un método que crea imágenes de la distribución de la conductividad eléctrica de objetos conductores mediante la inyección de corriente y la medición del campo eléctrico que resulta de la superficie del objeto. En esta investigación, este método se utilizará para reconstruir la distribución de la impedancia eléctrica, la cual es inversamente igual a la conductividad eléctrica, dirigido a la determinación de la madurez del mango.

La tomografía de impedancia eléctrica comúnmente es un conjunto de mediciones de voltajes adquiridos en la frontera de una zona conductiva, aplicando una serie de combinaciones de corriente y frecuencia. Las frecuencias que son inyectadas suelen ser de algunos KHz y menores a 1 MHz. Típicamente se aplican señales sinusoidales como fuente de corriente. En la superficie de la zona circular del objeto que se pretende analizar son colocados un número finito de electrodos, la manera en que se distribuyen los electrodos de contacto se hace de forma simétrica en la superficie de la región. Normalmente son utilizados 16 o 32 electrodos, pero se pueden utilizar más, con el fin de mejorar la resolución. La Figura 4 nos muestra un croquis de la forma en que se distribuyen los electrodos en la frontera de una zona circular en dos dimensiones. Es un sistema de 16 electrodos donde en un par de ellos inyecta corriente y en los demás se mide la diferencia de potencial (San-Pablo-Juárez, 2017).

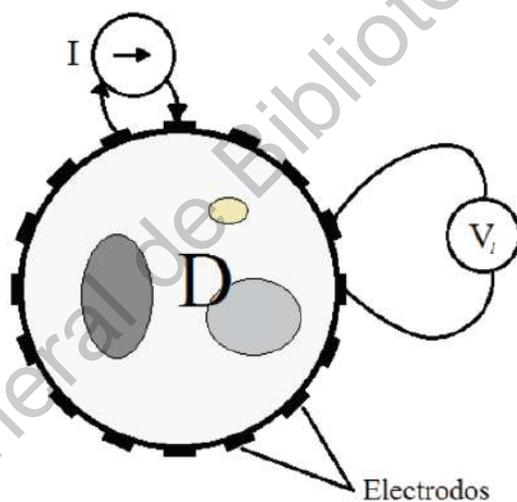


Figura 4. Configuración de la inyección de corriente y medición de potencial en TIE.

Sin embargo, los reportes que existen en la literatura para evaluar la tomografía de impedancia eléctrica como técnica para medir la madurez del mango. Por lo que es necesario determinar si existe una correlación entre la tomografía de impedancia eléctrica y los sólidos solubles, medición reconocida para determinar la madurez del mango. Lo anterior se debe hacer usando técnicas estadísticas.

## 2.6 Herramientas estadísticas

### 2.6.1 Análisis R y R

El análisis R y R es una metodología estadística que ayuda a evaluar un sistema de medición, es decir, evalúa la habilidad de medir el producto o proceso de una forma precisa y consistente. Los elementos estudiados son la repetibilidad y la reproducibilidad. La repetibilidad es la variación de medias que se obtiene al analizar a un operador cuando está utilizando el mismo método y herramientas para medir alguna característica en las partes, mientras que, la reproducibilidad es la variación de las medias que se obtiene mediante el mismo método y herramienta por parte de diferentes operadores (MSA, 2008). Este estudio es importante a la hora de analizar un proceso, pues es necesario demostrar que la variación del sistema de medición no es significativa, es decir, que no es lo suficientemente grande para cambiar la media del proceso.

El Grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG por sus siglas en inglés; 2010) propone que un sistema de medición sea aceptado bajo los términos de la Tabla 1.

Tabla 1. Aceptabilidad de un sistema de medición según la AIAG.

Porcentaje de variación del proceso	Aceptabilidad
Menos de 10%	El sistema de medición es aceptable.
Entre 10% y 30%	El sistema de medición es aceptable dependiendo de la aplicación, el costo del dispositivo de medición, el costo de la reparación u otros factores.
Más de 30%	El sistema de medición no es aceptable y debe ser mejorado.

Fuente: AIAG (2010).

La Tabla 1 muestra los criterios de aceptación para un sistema de medición, cuando el porcentaje de variación del proceso es menos de 10 % el sistema de medición es aceptable; cuando está entre 10 y 30 %, el sistema de medición puede ser aceptable dependiendo de

algunos factores, y cuando el porcentaje es más de 30 el sistema de medición no es aceptable y necesita mejorar. La AIAG (2010) también indica que el número de categorías distintas en el sistema de medición debería ser mayor o igual a 5.

### **2.6.2 Correlación de Pearson**

La correlación de Pearson tiene como objetivo medir el grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas, las cuales poseen una distribución normal bivariada conjunta. El coeficiente se define por la fórmula siguiente:

$$\rho = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho \leq 1$$

Cuando el coeficiente es positivo, la relación es directa entre las variables, mientras que cuando es negativo la relación es inversa, si  $\rho = 0$  las variables son independientes, es decir no existe correlación entre ellas (Est et al., 2007).

### **III. HIPÓTESIS**

La tomografía de impedancia eléctrica puede ser una herramienta no destructiva para determinar la madurez del mango.

### **IV. OBJETIVOS**

#### 4.1 Objetivo general:

Definir las condiciones para medir la impedancia eléctrica del mango durante su madurez, así como validar si existe una correlación con el contenido de sólidos solubles.

#### 4.2 Objetivos específicos:

- Validar el sistema de medición de impedancia eléctrica, mediante un análisis R y R.
- Determinar los cambios de impedancia eléctrica durante la maduración de mango y correlacionar con sus propiedades eléctricas.
- Encontrar la correlación entre los niveles de impedancia eléctrica y los sólidos solubles durante la madurez (Tiempo).

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Materiales

Los materiales utilizados para cumplir con el objetivo se enlistan a continuación:

- Medidor LCR de impedancia eléctrica Hioki de 4 terminales; (Hcur, Lcur, Hpot y Lpot).
- Refractómetro.
- Extractor Moulinex modelo A753.
- Electrodo de Ag/AgCl.
- Equipo de seguridad (bata, gafas, guantes, etc.).
- Instalaciones eléctricas.
- Mango Haden (*Mangifera Indica L.*), comprados en la central de abastos de Los Mochis, Sinaloa 2020.
- Software RStudio ®.
- Software Minitab ®.
- Software EIDORS ® para simulación de tomografías (Adler y Lionheart, 2006).

### 5.2 Esquema general de investigación

Para lograr cumplir con el objetivo general, la parte experimental se dividió en tres partes (Figura 5). Primeramente, se evaluó el sistema de medición, pues es necesario saber que el método no aporta una variación significativa ( $R$  y  $R$ ). Posteriormente se evaluó el comportamiento de la impedancia eléctrica a través de los cambios de maduración del mango respecto con el tiempo. Por último, se evaluó la correlación de la tomografía de impedancia eléctrica con el contenido de los sólidos solubles totales del mango durante su maduración.

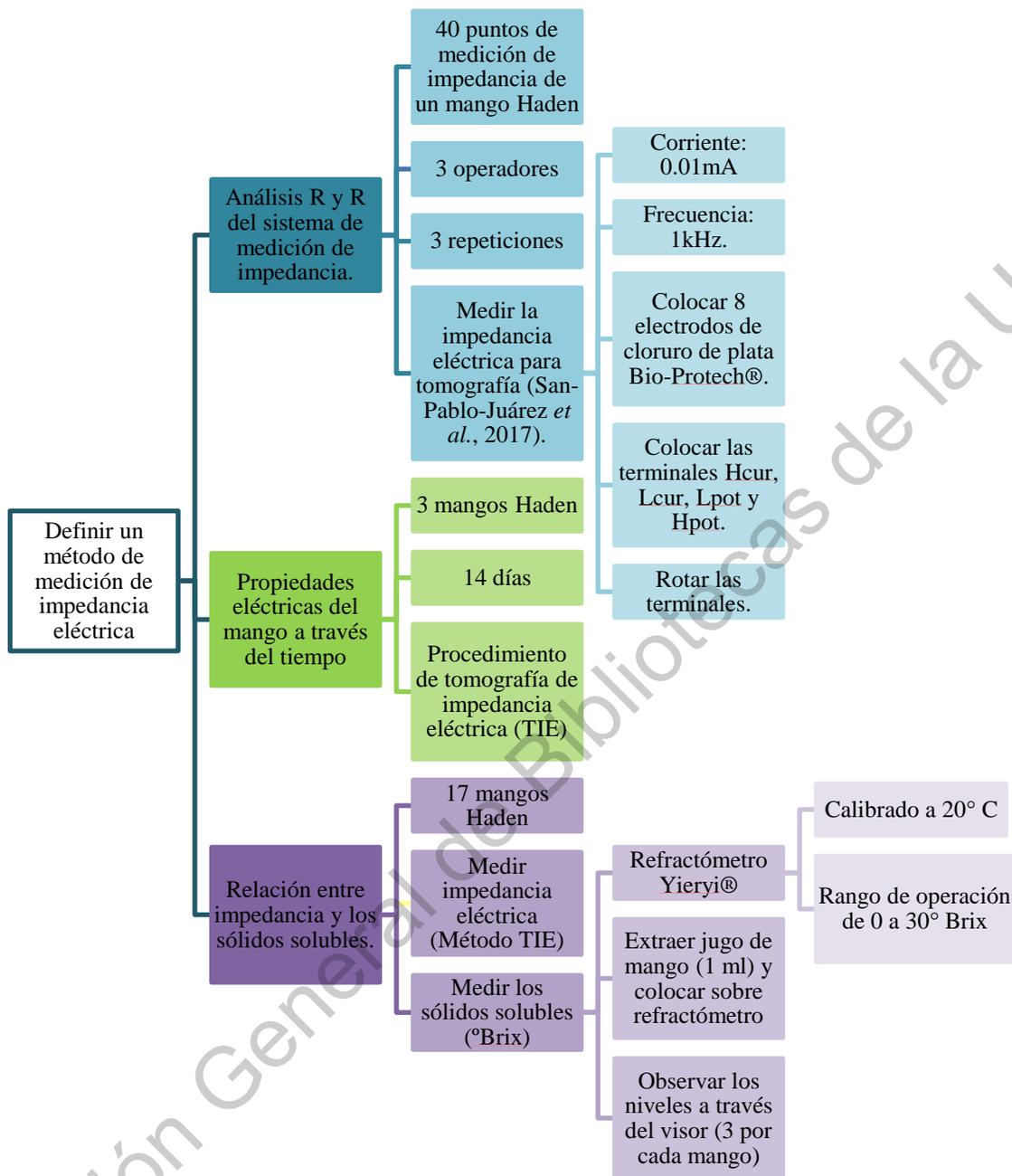


Figura 5. Esquema general de investigación

### 5.2.1 Análisis R y R del sistema de medición de impedancia eléctrica en un mango.

Para la realización del estudio se midieron los 40 puntos de medición de impedancia eléctrica de un mango, por 3 operadores y 3 repeticiones (Figura 5).

Para medir de manera homogénea y representativa el mango, se propone medir la impedancia eléctrica en 360 grados. Para ello se utilizó la metodología de Tomografía de impedancia eléctrica propuesta por San-Pablo-Juárez *et al.* (2017). La metodología consiste en colocar alrededor del mango una banda elástica con 8 electrodos de cloruro de plata 3M® numerados del 1 al 8 para determinar su localización espacial. En la Figura 6 se observa la posición de la banda y los electrodos.



Figura 6. Configuración de la conexión de los electrodos en el mango al medidor de impedancia eléctrica.

Las terminales Hcur y Lcur se fijaron inicialmente a los electrodos 1 y 2, mientras que el otro par de terminales Lpot y Hpot se rotaron sobre los demás electrodos, empezando por el 3-4, después 4-5, 5-6, 6-7 y 7-8, como se muestra en el bosquejo de la Figura 7. La variable respuesta es la impedancia eléctrica.

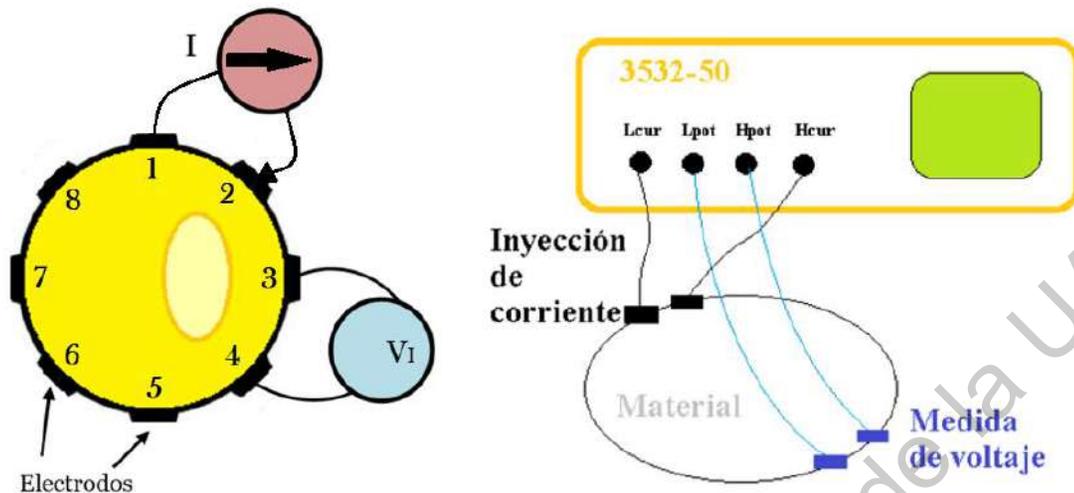


Figura 7. Inyección adyacente. Medición a 4 puntas con el medidor de impedancia eléctrica.

### 5.2.2 Propiedades eléctricas del mango a través del tiempo

Las propiedades eléctricas de los mangos se realizaron en tres mangos. Para realizar las mediciones se fijaron las terminales Hcur y Lcur en los electrodos 2 y 3, donde se obtienen 5 mediciones más (4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-1). Se llevo a cabo este procedimiento hasta regresar a la posición 1-2 de las terminales Hcur y Lcur, obteniendo en total 40 mediciones (Figura 5). La impedancia eléctrica fue medida desde todas las posiciones del mango garantizando que el resultado homogéneo sea característico de la condición del mango. Las mediciones fueron realizadas con una corriente de 0.01mA y una frecuencia de 1kHz. Los mangos se midieron diariamente durante 14 días, y se determinaron las propiedades eléctricas, como impedancia, y observar su comportamiento a través del tiempo.

### 5.2.3 Determinación de la impedancia eléctrica y los sólidos solubles respecto con el tiempo de maduración

Para encontrar la correlación entre los sólidos solubles y la impedancia eléctrica, se seleccionaron 17 mangos con un estado de madurez 1 (Figura 1). Las muestras se aleatorizaron y se tomaron tres mangos en los días 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Para ello, primero se determinó la impedancia eléctrica para cada mango con el método IE-360, previamente descrito. Posteriormente se midió el contenido de sólidos solubles (° Brix) de cada mango.

Los sólidos solubles (SS por sus siglas en inglés) se determinaron con ayuda de un refractómetro Yieryi® (fabricado en china) con un rango de operación de 0 a 30° Brix, el cual fue previamente calibrado a 20 °C con agua. Las mediciones se realizaron de acuerdo con lo reportado por Karl *et al.* (2016). Los mangos se limpiaron y se les retiró la cascara. La pulpa se cortó en pedazos y posteriormente se extrajo con ayuda de un extractor (Moulinex modelo A753). Finalmente se colocaron dos gotas en el cristal del refractómetro, se retiró el exceso y observar los niveles a través del visor. La medición se llevó a cabo por triplicado en cada mango.

Se realizaron 40 mediciones de impedancia eléctrica para cada mango y 3 en el caso de los sólidos solubles. Los resultados se analizaron con los análisis de correlación, regresión lineal, ANOVA y Tukey para cada parámetro medido con un nivel de significancia de 95%, procesado en Minitab 17®.



Figura 8. Refractómetro.

Fuente: [www.tplaboratorioquimico.com](http://www.tplaboratorioquimico.com)

### **5.3 Diseño y análisis estadístico**

Se usó un diseño totalmente aleatorio unifactorial para la determinación de las propiedades eléctricas respecto con el tiempo. Donde la variable independiente fue el tiempo y la variable respuesta fue la impedancia eléctrica. Los resultados se analizaron por un análisis de varianza y Tukey para cada parámetro medido con un nivel de significancia de 95%, procesado en Minitab 17®.

Posteriormente se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson entre los valores de impedancia eléctrica y sólidos solubles respecto con el tiempo de maduración. Así mismo se llevó a cabo un análisis de componentes principales para determinar.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Estudio R y R del sistema de medición de impedancia eléctrica en un mango.

El análisis de varianza del estudio R y R para confirmar la confiabilidad del método de medición se muestra en la Tabla 2. Los datos muestran que la parte es significativa ya que tiene un P-value menor a 0.05, mientras que el operador no es significativo ya que tiene un P de 0.211, al igual que la interacción con 0.293.

Tabla 2. Análisis de la varianza del estudio R y R del método de medición de impedancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parte	9	417.658	46.4064	5219.26	< 0.001
Operador	2	0.030	0.0151	1.70	0.211
Parte*Operador	18	0.160	0.0089	1.20	0.293
Repetibilidad	60	0.446	0.0074		
Total	89	418.294			

Donde: GL representa los grados en libertad, SC suma de cuadrados, MC los cuadrados medios, F el valor estadístico y P el P-value.

En la Tabla 3, se presentan las variables lineales, la parte continúa siendo significativa ( $P > 0.05$ ) y el operador no presenta diferencia significativa. Los resultados muestran que la parte presenta la variación propia del material y no por el operador.

Tabla 3. Análisis de la varianza reducido del estudio R y R del método de medición de impedancia eléctrica.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parte	9	417.658	46.4064	5976.07	< 0.001
Operador	2	0.030	0.0151	1.94	0.150
Repetibilidad	78	0.606	0.0078		
Total	89	418.294			

Donde: GL representa los grados en libertad, SC suma de cuadrados, MC los cuadrados medios, F el valor estadístico y P el P-value.

La Tabla 4 muestra que el porcentaje de contribución de la variación al sistema de medición, donde el total R y R es 3.94 %, del cual la repetibilidad aporta 3.88 % y la reproducibilidad 0.69 % y la parte a parte es de 99.92 %. El sistema de medición es capaz de distinguir entre 35 partes.

Tabla 4. Evaluación del sistema de medición de impedancia eléctrica.

Fuente	DE	6 x DE	% VE
Gage R y R total	0.08950	0.5370	3.94
Repetibilidad	0.08812	0.5287	3.88
Reproducibilidad	0.01563	0.0938	0.69
Operador	0.01563	0.0938	0.69
Parte a parte	2.27055	13.6233	99.92
Variación total	2.27231	13.6339	100.00

Donde: DE representa la desviación estándar y % VE el porcentaje de variación del estudio. Número de categorías distintas = 35

La Figura 9 muestra los componentes de la variación del sistema de medición de impedancia eléctrica. La reproducibilidad es el componente que aporta menos variación, seguido de la repetibilidad. La parte a parte es el que aporta mayor variabilidad al proceso, por lo que se puede concluir que las partes tienen la mayor contribución a la variación.

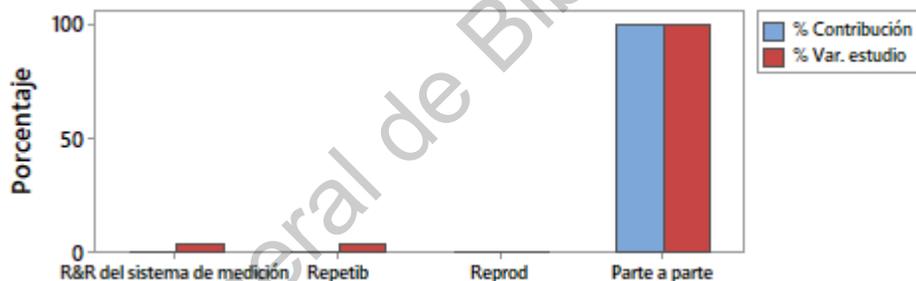


Figura 9. Componentes de variación del análisis R y R del método de medición de impedancia eléctrica.

La interacción de los operadores y las partes (Figura 10), muestra que los tres operadores tuvieron un desempeño muy similar, por lo que el método de medición es constante.

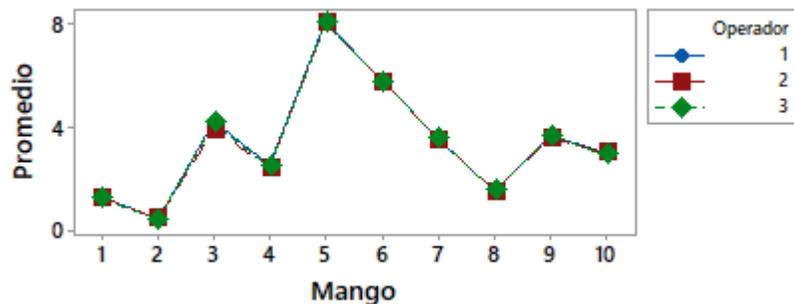


Figura 10. Interacción entre operadores y muestras del sistema de medición de impedancia.

Los resultados del análisis nos indican que la variación del total  $R$  y  $R$  es de 3.94 %, además el sistema de medición de impedancia eléctrica puede identificar entre 35 partes. Como la AIAG (2010) sugiere que el método es aceptable cuando la contribución de la variación total del sistema es menor a 10 % y cuando el sistema puede diferenciar entre 5 o más partes, se puede concluir que el sistema de medición es aceptado. Además, del 3.94 % que aporta el total del  $R$  y  $R$  a la variación del estudio, 3.88 % es debido a la repetibilidad, es decir a la técnica de medición, 0.69 % es debido a la reproducibilidad, lo que implica a los operadores.

## 6.2 Mediciones del mango a través del tiempo

Se realizaron mediciones a tres mangos Haden, donde se determinó la impedancia eléctrica a través del tiempo de maduración (13 días).

### 6.2.1 Impedancia eléctrica de los mangos a través del tiempo

Los resultados de impedancia eléctrica a través de los días de maduración se muestran en la Tabla 5. La impedancia más alta fue en el día 1 para los tres mangos; su desviación estándar fue de igual manera alta, lo que indica que los datos están muy dispersos entre sí. La tendencia de la impedancia y la desviación estándar es decreciente al paso de los días.

Tabla 5. Impedancia eléctrica de los mangos a través del tiempo.

Día	Impedancia eléctrica (k $\Omega$ )		
	Mango 1	Mango 2	Mango 3
1	0.54625 $\pm$ 0.4221	1.66882 $\pm$ 0.7851	1.5502 $\pm$ 0.6005
2	0.51912 $\pm$ 0.3777	1.57385 $\pm$ 0.7223	1.3833 $\pm$ 0.5861
3	0.4443 $\pm$ 0.2666	1.4468 $\pm$ 0.6585	1.1984 $\pm$ 0.5251
4	0.3430 $\pm$ 0.1552	1.1569 $\pm$ 0.4851	0.8689 $\pm$ 0.3726
5	0.3075 $\pm$ 0.1266	1.00457 $\pm$ 0.4137	0.6504 $\pm$ 0.2600
6	0.28425 $\pm$ 0.0996	0.83452 $\pm$ 0.3597	0.5019 $\pm$ 0.1789
7	0.29705 $\pm$ 0.1056	0.7287 $\pm$ 0.3616	0.4233 $\pm$ 0.1373
8	0.30767 $\pm$ 0.1078	0.60742 $\pm$ 0.2823	0.3712 $\pm$ 0.1383
9	0.3299 $\pm$ 0.1210	0.54787 $\pm$ 0.2568	0.3667 $\pm$ 0.1470
10	0.3204 $\pm$ 0.1073	0.48497 $\pm$ 0.2328	0.3361 $\pm$ 0.1409
11	0.32792 $\pm$ 0.1122	0.43067 $\pm$ 0.2210	0.3293 $\pm$ 0.1533
12	0.3757 $\pm$ 0.1569	0.42187 $\pm$ 0.2248	0.3611 $\pm$ 0.1955
13	0.43277 $\pm$ 0.1926	0.4536 $\pm$ 0.2396	0.4121 $\pm$ 0.2271

La Figura 11 muestra la impedancia eléctrica a través del tiempo, donde se puede observar que conforme pasan los días la impedancia eléctrica disminuye, además los primeros días de medición se observa una variación alta, la cual va disminuyendo al paso de los días.

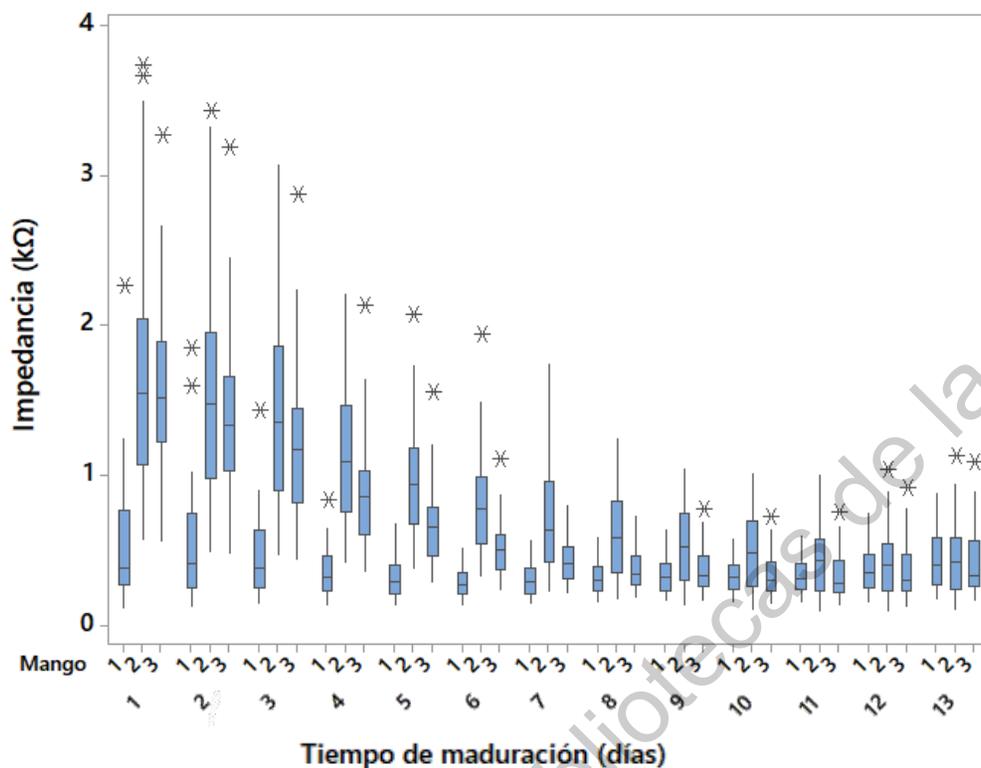


Figura 11. Cambios en la impedancia eléctrica del mango respecto con el tiempo de maduración.

Como se observa en la Figura 11, el comportamiento de la impedancia eléctrica de tres mangos respecto con el tiempo de maduración. Se puede observar que no existen diferencias significativas entre las muestras. Los primeros días muestran valores de impedancia eléctrica mayor y con más variación, sin embargo, podemos observar una disminución del valor de impedancia eléctrica respecto con el tiempo de maduración, además se tuvieron una desviación estándar más baja, es decir, fueron más estables con el paso del tiempo.

En la Figura 12 se muestra la gráfica cuadrática ajustada para el mango 1, donde podemos observar que los datos tienen una tendencia a disminuir conforme pasan los días, lo mismo pasa con los mangos 2 (Figura 13) y 3 (Figura 14).

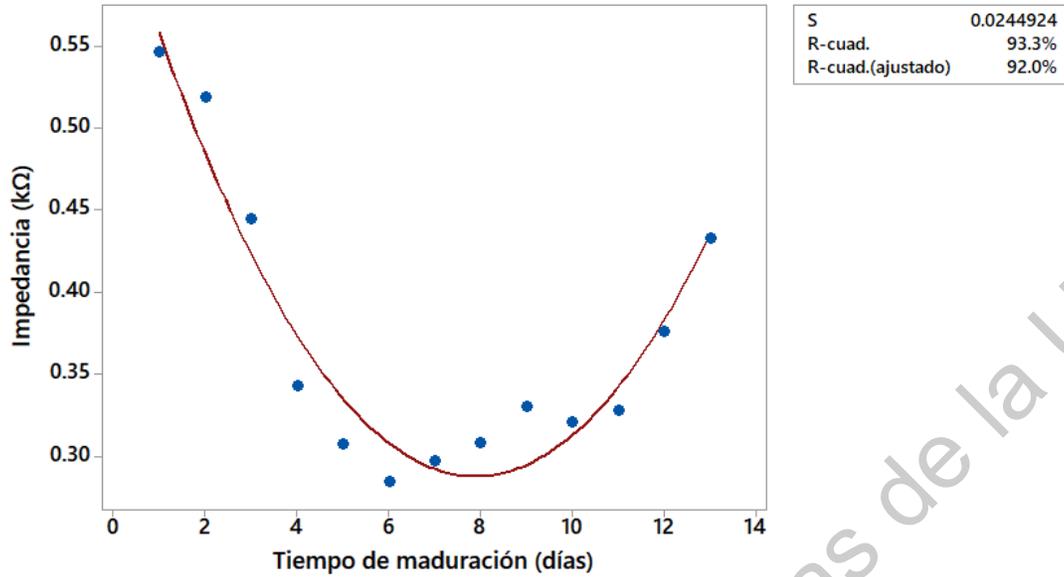


Figura 12. Comportamiento del mango 1 ajustado cuadráticamente

La Figura 12 muestra el comportamiento de la regresión cuadrática del mango 1, donde se puede observar que los datos siguen una tendencia, por lo que la R cuadrada ajustada es de 92%, esto indica que los datos se pueden predecir utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Impedancia eléctrica} = 0.6426 - 0.08983 \text{ día} + 0.005685 \text{ día}^2$$

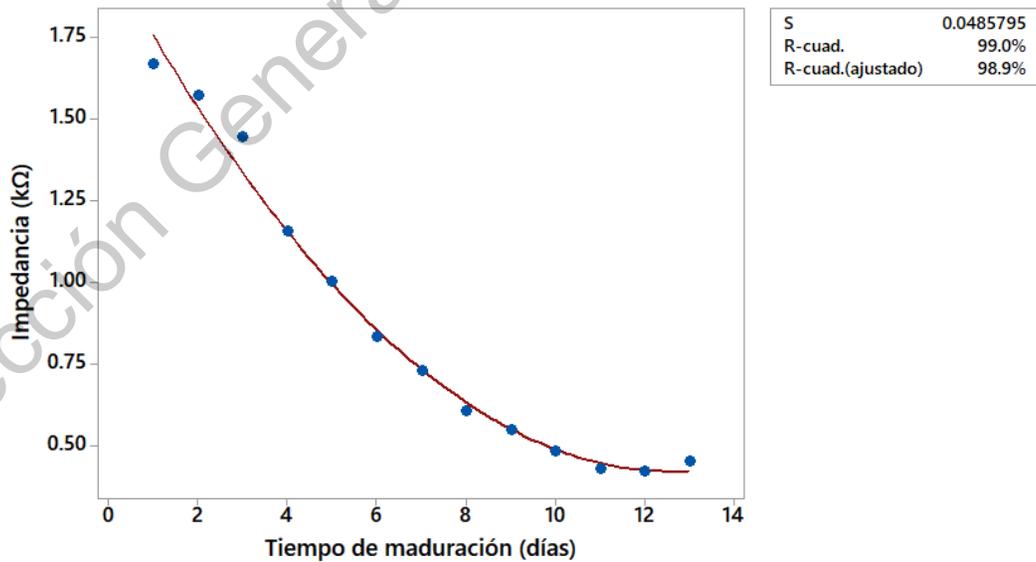


Figura 13. Comportamiento del mango 2 ajustado cuadráticamente

El comportamiento de la regresión cuadrática del mango 2 se muestra en la Figura 13. Los datos siguen una tendencia decreciente muy marcada, y tienen una R cuadrada ajustada del 98.9%, por lo que los datos se pueden predecir utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Impedancia eléctrica} = 1.998 - 0.2493 \text{ día} + 0.009850 \text{ día}^2$$

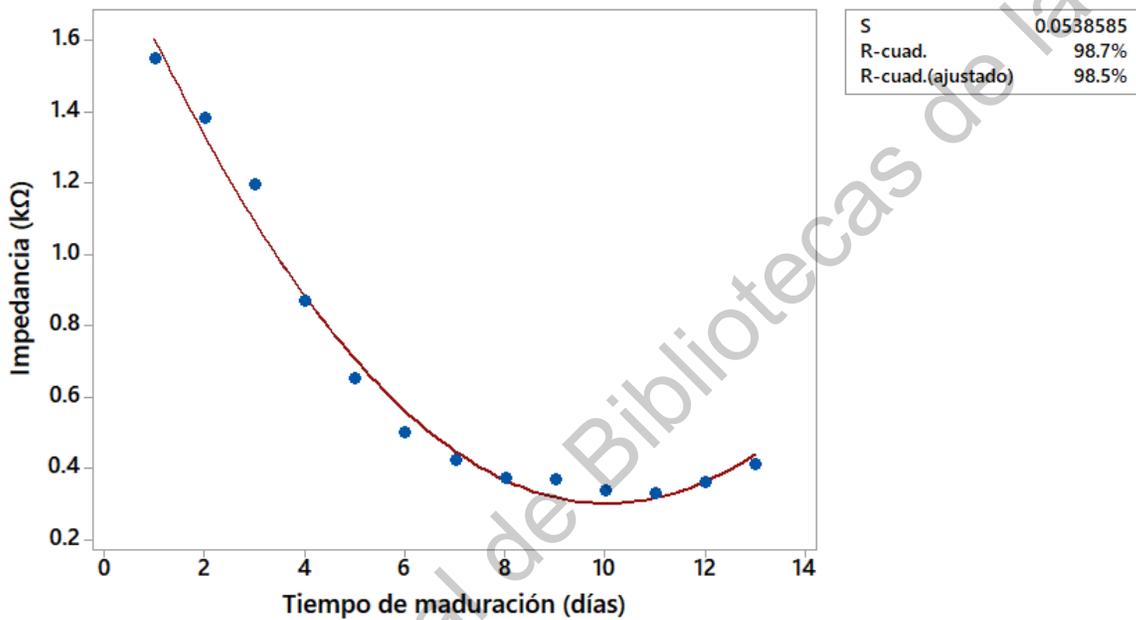


Figura 14. Comportamiento del mango 3 ajustado cuadráticamente

En la Figura 14 se muestra el comportamiento de la regresión cuadrática del mango 3, los cuales siguen la misma tendencia del mango 1 y 2, tiene una R cuadrada ajustada de 98.5%, lo cual indica que los datos se pueden predecir utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Impedancia eléctrica} = 1.913 - 0.3207 \text{ día} + 0.01596 \text{ día}^2$$

La tendencia de la impedancia eléctrica es a la baja, y cualquiera de los tres mangos presenta ecuaciones con una buena R de ajuste, por lo que se puede concluir que la impedancia eléctrica del mango disminuye al paso de los días.

### 6.2.2 Tomografía de impedancia eléctrica de los mangos a través del tiempo

En la Figura 15 se muestran las tomografías de los tres mangos, en los días 1, 4 y 9, en donde se puede observar que la medición del primer día es inestable. Para el cuarto día las mediciones ya son más estables y muestran lugares con mayor conductividad, es decir menor impedancia eléctrica. En el noveno día las mediciones se muestran más uniformes debido a que la semilla esté más húmeda, además presenta una escala de rojos más alta, es decir una mayor conductividad, ver programación en Anexo 1.

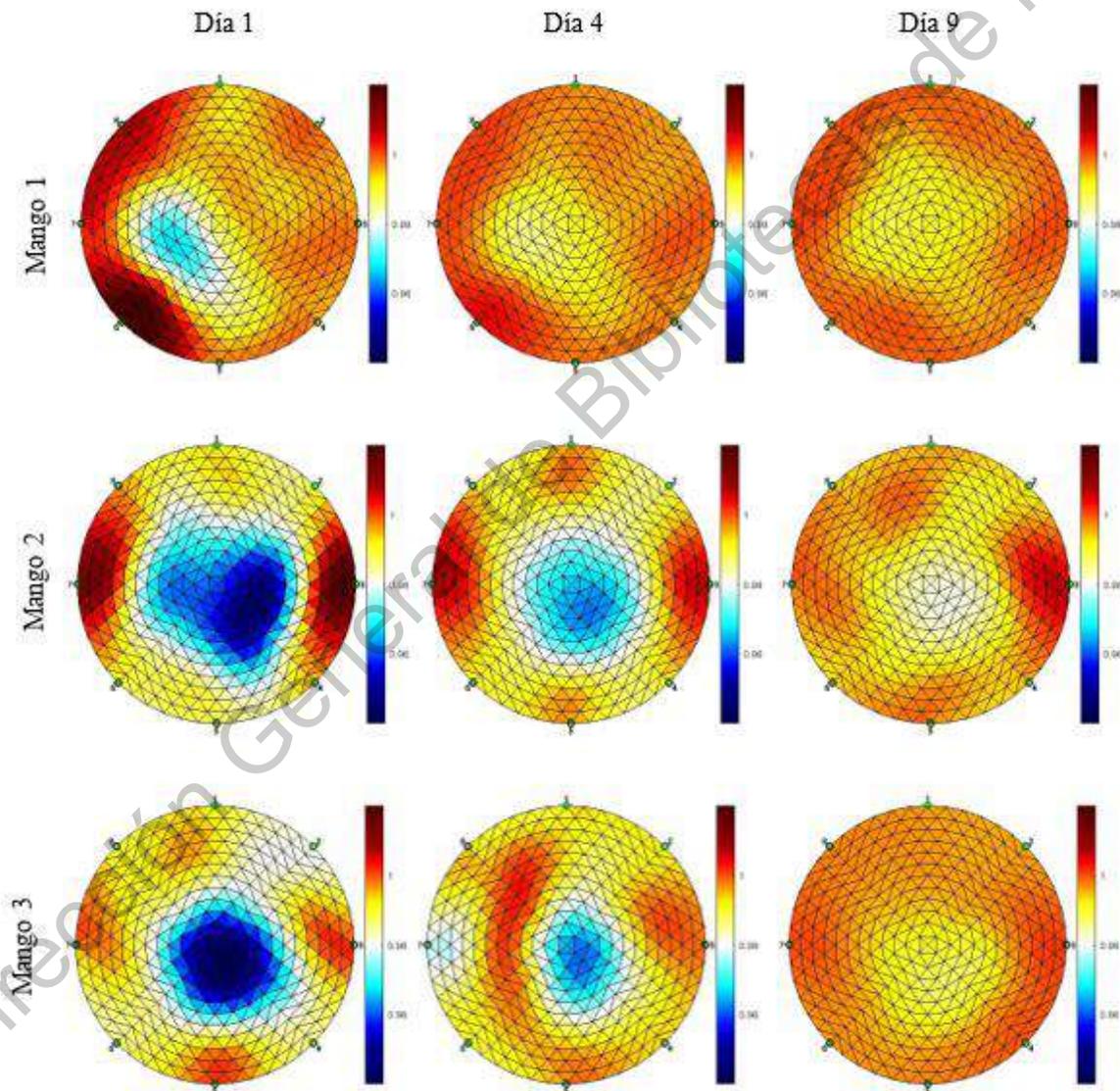


Figura 15. Tomografía de impedancia eléctrica a través del tiempo.

La impedancia eléctrica de los tejidos biológicos está relacionada con su estructura interna y su porcentaje de agua libre (Irastorza *et al.*, 2007). Según (Gonzalez, 2014) estas propiedades eléctricas dependen del tiempo y del espacio. Lo que explica que la conductividad aumente con el paso del tiempo, es decir al madurar el mango.

Por otro lado, para realizar las mediciones se utilizaron electrodos de plata, a los cuales se les aplicó un voltaje alterno, detectando la corriente que circula dentro del mango. Morales *et al.* (2010) menciona que la impedancia eléctrica se puede interpretar como la corriente que circula por los electrodos y el material biológico para analizar. Las mediciones del primer día muestran una mayor variación en sus propiedades eléctricas, la cual se puede deber a alguna inestabilidad en el electrodo.

La impedancia eléctrica disminuye (Figura 11) con el paso de los días, mientras que su conductividad aumenta, lo que genera tomografías más estables y con colores más cálidos, demostrando que éstas varían conforme pasa el tiempo, es decir mientras se va madurando el mango.

### 6.3 Relación entre impedancia eléctrica del mango y los sólidos solubles

Los resultados de impedancia eléctrica y sólidos solubles de los mangos respecto con el tiempo de maduración se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de impedancia eléctrica y sólidos solubles totales.

Mango	Impedancia (k $\Omega$ )	Sólidos solubles totales ( $^{\circ}$ Bx)
1	4.20 $\pm$ 1.19 <sup>cdef</sup>	12.93 $\pm$ 0.06 <sup>h</sup>
2	4.52 $\pm$ 1.88 <sup>bcd</sup>	12.00 $\pm$ 0.10 <sup>i</sup>
3	1.51 $\pm$ 1.03 <sup>g</sup>	9.00 $\pm$ 0.10 <sup>l</sup>
4	2.84 $\pm$ 1.52 <sup>efg</sup>	10.03 $\pm$ 0.06 <sup>k</sup>
5	1.33 $\pm$ 0.92 <sup>g</sup>	11.00 $\pm$ 0.10 <sup>j</sup>
6	3.23 $\pm$ 2.23 <sup>defg</sup>	12.03 $\pm$ 0.06 <sup>i</sup>
7	1.96 $\pm$ 1.62 <sup>fg</sup>	12.00 $\pm$ 0.00 <sup>i</sup>
8	6.05 $\pm$ 6.28 <sup>bc</sup>	17.57 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>
9	8.5165 $\pm$ 7.0679 <sup>a</sup>	17.97 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>
10	4.79 $\pm$ 1.34 <sup>bcd</sup>	16.97 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>

11	$1.52 \pm 0.84^g$	$14.47 \pm 0.06^g$
12	$6.82 \pm 6.35^{ab}$	$18.90 \pm 0.10^a$
13	$5.31 \pm 2.78^{bcd}$	$15.33 \pm 0.06^f$
14	$5.36 \pm 2.99^{bcd}$	$18.13 \pm 0.06^b$
15	$3.22 \pm 1.49^{defg}$	$16.30 \pm 0.10^e$
16	$3.61 \pm 1.12^{cdefg}$	$17.47 \pm 0.06^c$
17	$4.30 \pm 1.60^{cdef}$	$17.97 \pm 0.06^b$

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre las muestras ( $p < 0.05$ ).

En la Figura 16 se muestran los resultados de la impedancia eléctrica y los sólidos solubles de los tres mangos que se midieron en el mismo día. Los datos siguen el mismo comportamiento. Los datos de sólidos, así como de impedancia eléctrica presentan una variación importante, lo cual se puede deber a que a pesar de que los mangos son del mismo lote, no podemos tener la certeza que todos compartían exactamente la misma madurez al comenzar la experimentación. Sin embargo, si se observa en la Figura 1, que muestra los valores de sólidos respecto con la etapa de maduración para la variedad de mango estudiada, se puede ver que no existe una tendencia clara del comportamiento de sólidos solubles respecto con el tiempo de maduración, lo que concuerda con los resultados obtenidos.

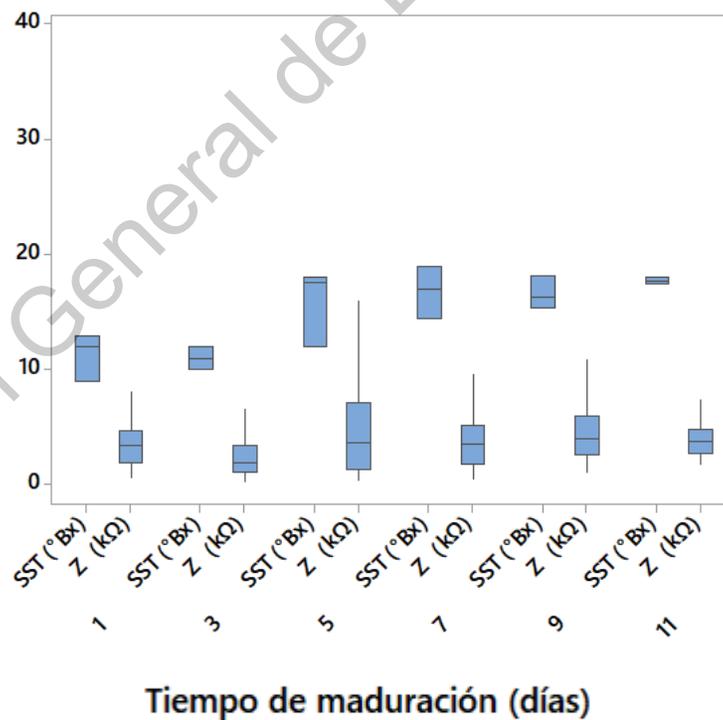


Figura 16. Impedancia eléctrica y sólidos solubles del mango a través del tiempo.

La correlación entre las variables se muestra en la Figura 17. Se logró una correlación significativa de 72 %, es decir, la impedancia eléctrica tiene una alta correlación con los sólidos solubles (madurez del mango), ver programación en Anexo 1. Sin embargo, a pesar de ser un valor alto, no puede ser usada como predecible para determinar la madurez del mango, por lo que es necesario aumentar el número de muestras para mejorar el valor de correlación.

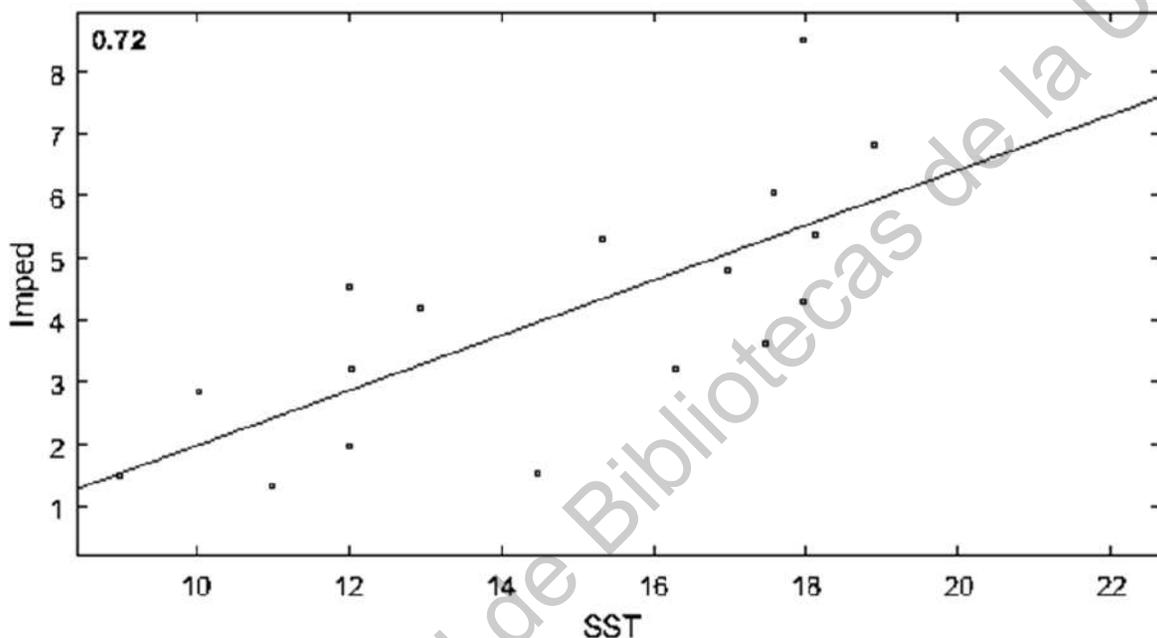


Figura 17. Correlación de los sólidos solubles con la impedancia eléctrica

La impedancia eléctrica tiene una correlación con los sólidos solubles de 72%, lo cual es significativo, pero no se puede considerar predictivo.

Mediante el análisis R&R se pudo determinar un método confiable para la toma de mediciones de impedancia eléctrica, las cuales también sirven para crear tomografías de impedancia eléctrica confiables. Esto se debe a los múltiples ajustes que se le hicieron a la experimentación antes de llevarse a cabo. Esta herramienta estadística no se había utilizado antes en investigaciones que han buscado una relación entre la impedancia eléctrica de una fruta y su madurez. Otro método innovador fue la regresión cuadrática, la cual se ajustó muy

bien al comportamiento del mango. Esta regresión ha dado un mejor porcentaje que la regresión lineal, que normalmente es la que reportan otros estudios.

Dentro de las cosas positivas de este proyecto, se encuentran que se puede definir la madurez del mango de una manera no destructiva, con una validez similar al método más confiable actualmente, el de los sólidos solubles. Además, el método de la tomografía de impedancia eléctrica podría abrir paso a futuras investigaciones, ya sea para mejorar este mismo o para explorar otras áreas. A pesar de que el método es sencillo, existen algunas complicaciones para llevar a cabo este método como el equipo de medición, el cual es costoso y delicado. Otra desventaja también es la variación que puede haber entre las mismas mediciones de una pieza, las cuales pueden hacer creer que los electrodos no tienen un buen contacto, sin embargo, esto es normal en los mangos, ya que la semilla tiene una forma irregular respecto a la pulpa, haciendo que la conductividad sea muy diferente en algunos puntos.

## VII. CONCLUSIONES

La hipótesis nula se acepta, pues la tomografía de impedancia eléctrica puede ser una herramienta no destructiva para determinar la madurez del mango, ya que cuenta con un 72 % de correlación con los sólidos solubles.

El método de sólidos solubles es el que actualmente cuenta con mayor efectividad para determinar la madurez del mango, sin embargo, ni siquiera este método tiene una efectividad perfecta, pues algunos escenarios de madurez expuestos en la Figura 1 por el mangoboard.org no están bien definidos, es decir algunos escenarios están empalmados.

El método de medición de impedancia eléctrica para determinar la medición del mango es confiable, ya que la parte a parte aporta 99.92 % a la variación total, mientras el sistema total R y R tiene un aporte del 3.94 %, además el sistema puede distinguir entre 35 partes distintas.

Las propiedades eléctricas del mango van cambiando de acuerdo con el tiempo de madurez del mango, por tanto, se podría decir que a como el mango va madurando su impedancia eléctrica también va cambiando, ambas con una tendencia clara.

## VIII. REFERENCIAS

Adler, A., y W. R. B. Lionheart. Uses and abuses of EIDORS : an extensible software base for EIT. 25. doi:10.1088/0967-3334/27/5/S03.

Benedetti, S., S. Buratti, A. Spinardi, S. Mannino, y I. Mignani. 2008. Electronic nose as a non-destructive tool to characterise peach cultivars and to monitor their ripening stage during shelf-life. 47:181–188. doi:10.1016/j.postharvbio.2007.06.012.

Blanes, C., V. Cortés, C. Ortiz, M. Mellado, y P. Talens. 2015. Non-Destructive Assessment of Mango Firmness and Ripeness Using a Robotic Gripper. 1914–1924. doi:10.1007/s11947-015-1548-2.

Borsoi, R. A., J. Cesar, C. Aya, G. Holsbach, J. Carlos, y M. Bermudez. 2018. Super-resolution reconstruction of electrical impedance tomography images ☆. Comput. Electr. Eng. 69:1–13. doi:10.1016/j.compeleceng.2018.05.013. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.05.013>

Brezmes, J., E. Llobet, X. Vilanova, J. Orts, G. Saiz, y X. Correig. 2001. Correlation between electronic nose signals and fruit quality indicators on shelf-life measurements with pink lady apples. 80.

Castelo, A. A. 2005. Determinación del estado de madurez óptimo de mango “ Ataulfo ” destinado a procesamiento mínimo. 21–25.

Chowdhury, A., T. K. Bera, D. Ghoshal, y B. Chakraborty. 2016. ELECTRICAL IMPEDANCE VARIATIONS IN BANANA RIPENING : AN ANALYTICAL STUDY WITH ELECTRICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY. 00. doi:10.1111/jfpe.12387.

Chowdhury, A., P. Singh, T. K. Bera, D. Ghoshal, y B. Chakraborty. 2017. Electrical impedance spectroscopic study of mandarin orange during ripening. J. Food Meas. Charact. 11:1654–1664. doi:10.1007/s11694-017-9545-y.

Ducamp-Collin, M.-N., T. Djioua, H. Sallanon, F. Lopez-Lauri, H. Filgueiras, M. F. Jr, A. Coudret, y F. Charles. 2009. Improving the storage of minimally processed mangoes

(*Mangifera indica* L.) by hot water treatments. *Postharvest Biol. Technol.* 52:221–226. doi:10.1016/j.postharvbio.2008.10.006.

Est, E., E. Bioma, y G. Grica. 2007. De Pearson a Spearman. 183–192.

Gómez, A. H., J. Wang, y A. G. Pereira. 2007. MANDARIN RIPENESS MONITORING AND QUALITY ATTRIBUTE EVALUATION USING AN ELECTRONIC NOSE TECHNIQUE. 50:2137–2142.

Gonzalez, R. 2014. IMPEDANCIA BIO-ELÉCTRICA COMO TÉCNICA NO-DESTRUCTIVA PARA MEDIR LA FIRMEZA DE LA FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch) Y SU RELACIÓN CON TÉCNICAS CONVENCIONALES.

Gopalan, N., R. K. Sharma, O. P. Chauhan, S. Lakshmi, A. K. Pandey, y N. Ravi. 2017. Non-destructive Quality Monitoring of Fresh Fruits and Vegetables. *Def. Life Sci. J.* 2:103. doi:10.14429/dlsj.2.11379.

Hafezi, M. H., y T. Kundu. 2018. Peri-ultrasound modeling for surface wave propagation. *Ultrasonics.* 84:162–171. doi:10.1016/j.ultras.2017.11.003. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.11.003>

Hajimorad, M., S. Alhloul, H. Mustafa, M. So, y H. Oswal. 2016. Application of Polypyrrole-Based Selective Electrodes in Electrochemical Impedance Spectroscopy to Determine Nitrate Concentration. 4–6.

Hern, A., J. Wang, y A. Garc. 2006. Evaluation of tomato maturity by electronic nose. 54:44–52. doi:10.1016/j.compag.2006.07.002.

Hlaváčová, Z. 2003. Low frequency electric properties utilization in agriculture and food treatment. 2003:125–136.

Islam, M., K. Wahid, y A. Dinh. 2018. Assessment of Ripening Degree of Avocado by Electrical Impedance Spectroscopy and Support Vector Machine. 2018.

J. R. González-Araiza, M. C. Ortiz-Sánchez, M. V.-L. & J. M. C. 2016. Application of electrical bio-impedance for the evaluation of strawberry ripeness. 2912.

doi:10.1080/10942912.2016.1199033.

Jha, S. N., K. Narsaiah, y A. L. Basediya. 2011. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods — a review. 48:387–411. doi:10.1007/s13197-011-0263-x.

Kertész, Á., Z. Hlaváčová, E. Vozáry, y L. Staroňová. 2015. Relationship between moisture content and electrical impedance of carrot slices during drying \*\*. 61–66. doi:10.1515/intag-2015-0013.

Kovalyshyn, S. J., O. P. Shvets, S. Grundas, y J. Tys. 2013. Use of the electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds. 419–424. doi:10.2478/intag-2013-0012.

Llobet, E., E. L. Hines, J. W. Gardner, y S. Franco. 1999. Non-destructive banana ripeness determination using a neural network-based electronic nose. Meas. Sci. Technol. 10:538–548. doi:10.1088/0957-0233/10/6/320. Available from: <https://doi.org/10.1088%2F0957-0233%2F10%2F6%2F320>

M.A. San-Pablo-Juárez, E. Morales-Sánchez, F. Ireta-Moreno, R. Ávalos-Zúñiga, J. J. G.-B. 2017. Method for measuring bone density through the electrical conductivity calculated by Electrical Impedance Tomography. Available from: <dx.doi.org/10.17488/RMIB.38.2.5>

Miclaus, S., y M. Morega. 2010. Characterisation of the electromagnetic environment in a tem cell for exposure of small biological samples in the uhf band • . 55:195–204.

MSA. 2008. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE MEDICIÓN, cuarta edición.

Nakawajana, N., A. Terdwongworakul, y S. Teerachaichayut. 2016. Minimally destructive assessment of mangosteen translucency based on electrical impedance measurements. 171:137–144.

Nardo Ramírez, Angel Regueiro, Olimpia Arias, R. C. 2013. Espectroscopía de impedancia electroquímica, herramienta eficaz para el diagnóstico rápido microbiológico. 84:487–492. Available from: <http://ir.obihiro.ac.jp/dspace/handle/10322/3933>

National Mango Board. 2015. Protocolo para el Manejo y la Maduración del Mango. Available from: <http://www.mango.org/Mangos/media/Media/Documents/Research And Resources/Downloads/Industry/Market>

Support/Mango\_Handling\_and\_Ripening\_Protocol\_Spn.pdf

Neto, A. F., N. C. Olivier, y E. R. Cordeiro. 2017. Determination of mango ripening degree by electrical impedance spectroscopy. *Comput. Electron. Agric.* 143:222–226. doi:10.1016/j.compag.2017.10.018. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.018>

Padda, M. S., V. T. Cassandro, R. M. Garcia, D. C. Slaughter, y E. J. Mitcham. 2011. Postharvest Biology and Technology Methods to analyze physico-chemical changes during mango ripening: A multivariate approach. *Postharvest Biol. Technol.* 62:267–274. doi:10.1016/j.postharvbio.2011.06.002. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.002>

Paszkowski, B., A. Wilczek, A. Szyplowska, y A. Nakonieczna. 2014. A low-frequency sensor for determination of honey electrical properties in varying temperature conditions. 138:17–22.

Properties, P. 2005. E: Food Engineering and Physical Properties Modeling of Active Modified Atmosphere Packaging of Endives Exposed to Several. 70.

SAGARPA. 2017. Agrícola Nacional. Planeación agrícola Nac. 2017-2030. I:1–14.

Santos, J. G., F. Andre, N. Fernandes, L. D. S. Oliveira, M. Raquel, y A. De Miranda. 2015. Influence of Ultrasound on Fresh-Cut Mango Quality Through Evaluation of Enzymatic and Oxidative Metabolism. 1532–1542. doi:10.1007/s11947-015-1518-8.

Schouten, R. E., S. Fan, J. C. Verdonk, Y. Wang, N. Fauzana, M. Kasim, E. J. Woltering, y L. M. M. Tijssens. 2018. Mango Firmness Modeling as Affected by Transport and Ethylene Treatments. 9:1–16. doi:10.3389/fpls.2018.01647.

Scientific, N., E. S. Panigo, I. M. Dellaferrera, y A. Vegetti. 2018. Novel Topological-Architectural Parameters of Root Growth in Soybean ( *Glycine max* ( L .) Merrill ) to

Determine the Presence of Soil Mechanical Impedance.  
doi:10.17485/ijst/2018/v11i3/108620.

Simon, J. E., A. Hetzroni, B. Bordelon, G. E. Miles, y D. J. Charles. 1996. Electronic Sensing of Aromatic Volatiles for Quality Sorting of Blueberries. 61:967–970.

Slaughter, D. C. 2009. Evaluación de métodos no destructivos para la detección de la madurez en Mangos : 1–19.

Venkatesh, M. S., y B. Engineering. 2005. An overview of dielectric properties measuring techniques.

Zepeda, M., y M. G. Martínez. 2020. Correlación entre los sólidos solubles y la impedancia eléctrica como método para determinar la madurez del mango. 12.

## IX. Anexos.

### Anexo 1. Programación en Matlab tomografía de impedancia eléctrica.

#### *\*Iniciación de librería Eidors*

```
% CUSTOM EIDORS STARTUP FILE
% this must be a script so that octave can source it
try
    eidors_startup
catch
    [message id] = lasterr;
    if strcmp(id,'MATLAB:infoXmlValidationError')
        % An old version of MATLAB that we don't know how to write
        % info.xml for
    else
        error.message = message;
        error.identifier = id;
        rethrow(error);
    end
end
end
```

#### *\*Cargar datos desde excel*

```
[num,txt,row] = xlsread('C:\Users\Alan\Desktop\mango uno.xlsx');
%TIEMPO
MT1_01 = num(1:40,1);
MT1_02 = num(1:40,2);
MT1_03 = num(1:40,3);
MT1_04 = num(1:40,4);
```

```
MT1_05 = num(1:40,5);  
MT1_06 = num(1:40,6);  
MT1_07 = num(1:40,7);  
MT1_08 = num(1:40,8);  
MT1_09 = num(1:40,9);  
MT1_10 = num(1:40,10);  
MT1_11 = num(1:40,11);  
MT1_12 = num(1:40,12);  
MT1_13 = num(1:40,13);  
MT1_14 = num(1:40,14);
```

```
[num,txt,row] = xlsread('C:\Users\Alan\Desktop\mango dos.xlsx');
```

```
%TIEMPO
```

```
MT2_01 = num(1:40,1);  
MT2_02 = num(1:40,2);  
MT2_03 = num(1:40,3);  
MT2_04 = num(1:40,4);  
MT2_05 = num(1:40,5);  
MT2_06 = num(1:40,6);  
MT2_07 = num(1:40,7);  
MT2_08 = num(1:40,8);  
MT2_09 = num(1:40,9);  
MT2_10 = num(1:40,10);  
MT2_11 = num(1:40,11);  
MT2_12 = num(1:40,12);  
MT2_13 = num(1:40,13);  
MT2_14 = num(1:40,14);
```

```
[num,txt,row] = xlsread('C:\Users\Alan\Desktop\mango tres.xlsx');
```

```
%TIEMPO
```

```
MT3_01 = num(1:40,1);
```

```
MT3_02 = num(1:40,2);
```

```
MT3_03 = num(1:40,3);
```

```
MT3_04 = num(1:40,4);
```

```
MT3_05 = num(1:40,5);
```

```
MT3_06 = num(1:40,6);
```

```
MT3_07 = num(1:40,7);
```

```
MT3_08 = num(1:40,8);
```

```
MT3_09 = num(1:40,9);
```

```
MT3_10 = num(1:40,10);
```

```
MT3_11 = num(1:40,11);
```

```
MT3_12 = num(1:40,12);
```

```
MT3_13 = num(1:40,13);
```

```
MT3_14 = num(1:40,14);
```

```
*Crear tomografía
```

```
V_m = MT3_10;
```

```
imdl= mk_common_model('c2c2',8);
```

```
img= calc_jacobian_bkgnd( imdl );
```

```
vh= fwd_solve(img);
```

```
img0 = inv_solve(imdl,vh,V_m); %resuelve tomografía
```

```
img0.calc_colours.ref_level= .97; %centro de la escala
```

```
%img0 = inv_solve(imdl,vh,V_m);
```

```
img0.calc_colours.clim = .07; %Ajusta los topes de valores cotas
```

```
show_fem(img0,[1,1,0]); axis off ; axis square
```

*\*Programación en Matlab correlación impedancia y SST.*

```
T = readtable('C:\Users\Alan\Desktop\SST mangos.xlsx');
```

```
% correlacion
```

```
corrplot (T);
```

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ