



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE FIRMEZA DE CEREZAS BASADO EN ULTRASONIDO

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Agrícola con
mención en Agroindustrias

FABIOLA VIANNEY SOTO CHÁVEZ
CHILLÁN-CHILE
2020

Profesor Guía: Rudi Radrigán Ewoldt
Dpto. de Agroindustrias
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Agroindustrias de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Profesor Guía

Dr. Rudi Radrigán Ewoldt
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Profesor Co-Guía

Dra. María E. González Rodríguez
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora:

Dr. Juan A. Cañumir Veas
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Mg. Sixto S. Rojas Cabalín
Instituto Tecnológico de la Universidad
Católica de la Santísima Concepción

Dr. Víctor H. Escalona Contreras
Facultad de Ciencias Agronómicas
Universidad de Chile

Director de Programa

Dr. Javier F. Ferrer Valenzuela
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción



A los amores de mi vida

AGRADECIMIENTOS

“Más valen frutos que flores, que los unos dan sabores, y las otras no más que olores”

(J.A. Solís Miranda, El libro de todos los refranes).

Se agradece al Programa CORFO 16PTECF 666-47, Centro para la Investigación e Innovación en Fruticultura para la Zona Sur. Línea: Aumento del potencial de almacenamiento y de la calidad general de cerezas.



TABLA DE CONTENIDO

	Página
Portada.....	i
Comisión evaluadora.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Tabla de contenido.....	v
Índice de tablas.....	vii
Índice de ilustraciones.....	viii
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	3
2. Marco teórico.....	4
2.1. Cerezas.....	4
2.1.1. Caracterización general.....	4
2.1.1.1. Crecimiento y maduración.....	4
2.1.1.2. Cosecha.....	7
2.1.1.2.1. Características de calidad.....	8
2.1.1.2.2. Características de condición.....	9
2.1.1.2.3 Características nutricionales.....	9
2.1.1.3. Postcosecha.....	10
2.1.1.4. Variedades.....	11
2.1.2. Situación de mercado.....	13
2.1.2.1. Superficie plantada.....	13
2.1.2.2. Producción.....	14
2.1.2.3. Exportación.....	14
2.1.2.4. Importación.....	16
2.2. Importancia de la firmeza de cereza como atributo de calidad de cerezas.....	17
2.2.1. Características generales.....	17

2.2.2. Determinación de firmeza en cerezas	17
2.3. Ultrasonido	20
2.3.1. Definición y fundamentos de la tecnología de ultrasonido	20
2.3.1.1. Parámetros asociados al ultrasonido	25
2.3.1.2. Ventajas y desventajas	28
2.3.2. Aplicaciones de ultrasonido	28
2.3.2.1. Ultrasonidos para análisis de frutas y verduras	28
2.3.2.2. Otras aplicaciones en la industria alimentaria	30
2.3.3. Ultrasonido y cerezas	31
3. Metodología	32
3.1. Diseño y construcción del dispositivo	32
3.1.1. Diseño	32
3.1.1.1. Consideraciones iniciales	32
3.1.1.2. Parámetros técnicos.....	33
3.1.2. Construcción del dispositivo.....	35
3.1.2.1. Configuración de laboratorio	35
3.1.2.2. Prueba de configuraciones de la GUI	40
3.1.2.3. Prueba de transductores	42
3.2. Testeo en cerezas.....	43
3.2.1. Caracterización del fruto.....	43
3.2.2. Mediciones ultrasónicas.....	45
3.2.3. Mediciones mecánicas	46
3.2.4. Análisis de datos	47
4. Resultados y discusión	49
5. Conclusiones	66
6. Bibliografía	77
7. Anexos	78
7.1. Ilustraciones	78
7.2. Tabla de coeficientes.....	82
Manuscrito de publicación científica	

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 4.1. Resultados de las mediciones de masa, diámetro, firmeza y voltaje, de cerezas cv. Bing. Mas las medidas de resumen y el voltaje sin muestra.....	49
Tabla 4.2. Resultados de las mediciones de masa, diámetro, firmeza y media de voltaje, cerezas cv. Regina. Incluye las medidas de resumen y el voltaje sin muestra.....	50
Tabla 7.1. Resumen de coeficientes de correlación R y coeficientes de determinación R ² , entre valores de variables medidas en cerezas, para el cv. Bing y para el cv. Regina	82



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Página
Figura 2.1. Izquierda: curva teórica de crecimiento de fruto doble sigmoidea de frutos de cereza (Fuente: Candan et al., 2017); derecha: patrón de crecimiento del fruto en cerezo ‘Bing’ en base a diámetro (Fuente: Adaptado de Bastías et al., 2014)	6
Figura 2.2. Exportación histórica de cereza en Chile (Fuente: Elaboración propia con datos de iQonsulting, 2020).....	16
Figura 2.3. Efecto piezoeléctrico directo (izquierda) e inverso (derecha). Fuente: Martín (2018)	21
Figura 2.4. Funcionamiento, modo pulso-eco (a), modo transmisión directa (b). Fuente: Elaboración propia	22
Figura 2.5. Se muestra como una onda ultrasónica es reflejada al encontrarse con un defecto en el interior del material de prueba (Fuente: Adaptado de Santos et al., 2005)	27
Figura 3.1. Configuración de laboratorio para la medición ultrasónica en cereza dulce. a. Soporte 1, b. Generador de funciones, c. TDC1000-C2000EVM, d. Computadora y e. Osciloscopio digital. Fuente: Elaboración propia	36
Figura 3.2. Descripción de la pantalla del osciloscopio. Fuente: Elaboración propia	39
Figura 3.3. Señal ultrasónica de forma de onda sinusoidal de distinto rango en el eje horizontal: a = 100 μ s/ div; b y c = 50 μ s/div; d = 2,5 μ s/div. Sensibilidad en el eje vertical: a, b, c, y d = 1 V/ div. Fuente: Elaboración propia	39
Figura 3.4. GUI del TDC1000C2000EVM, sección TDC1000. Fuente: Elaboración propia	41

Figura 3.5. GUI del TDC1000C2000EVM, sección SETUP. Fuente: Elaboración propia	41
Figura 3.6. Soporte 2, a: vista frontal, b: fotografía frontal, c: vista isométrica de arriba, y d: vista isométrica de abajo. Fuente: Elaboración propia	43
Figura 3.7. Frutos de cerezas utilizadas para las mediciones, a temperatura ambiente de 20° C. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 3.8. A la izquierda, la medición de la masa con la balanza de precisión, y a la derecha la medición de diámetro con el pie de metro digital. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 3.9. Cerezas en el soporte y en contacto con el transductor de 40 kHz, durante las mediciones ultrasónicas. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 3.10. Cerezas ubicadas en el plato metálico del equipo Cherry-Tex CV2.0, durante la medición de firmeza por compresión. Fuente: Elaboración propia	47
Figura 4.1. Forma de onda del eco (capturada de pantalla del osciloscopio, escala 100 μ s x 1 V), durante el análisis de la cereza con el transductor de 40 kHz con 14 pulsos. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 4.2. Gráficas de voltaje, con cerezas y sin muestra. Izquierda: cv. Bing, derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 4.3. Análisis de la varianza para un diseño completamente aleatorizado de voltaje, en control (sin cereza) y en cerezas. Cuadro superior: cv. Bing, número de pulsos igual a 14, cuadro inferior: cv. Regina, número de pulsos igual a 16. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 4.4. Gráficas de regresión lineal simple de la relación funcional entre la firmeza vs el voltaje, la masa vs el voltaje, y el diámetro vs el voltaje, en cerezas dulces. A la izquierda el cv. Bing y a la derecha el cv. Regina. Fuente: Elaboración propia	55

Figura 4.5. Análisis de regresión lineal entre firmeza y voltaje. Cuadro superior: cv. Bing, cuadro inferior: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 4.6. Gráfica de regresión lineal entre la firmeza versus la masa, y entre la firmeza versus el diámetro, de cerezas dulces. Izquierda: cv. Bing; y derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia	59
Figura 4.7. Gráfica de modelo cuadrático de la relación entre el diámetro y el voltaje, de cerezas. Izquierda: cv. Bing, y derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia	61
Figura 4.8. Gráfica de regresión lineal de la relación entre el diámetro y la masa, de cerezas. Izquierda: cv. Bing, y derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 7.1. Registro de configuración de la GUI TDC1000-C2000EVM, parte 1. Fuente: Elaboración propia	78
Figura 7.2. Registro de configuración de la GUI TDC1000-C2000EVM, parte 2. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 7.3. Registro de configuración de la GUI TDC1000-C2000EVM, parte 3. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 7.4. Formas de fruto de cereza (<i>P. avium</i> L.). Fuente: UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS OBTENCIONES VEGETALES (2006).....	80
Figura 7.5. Análisis de regresión lineal entre diámetro y masa. Cuadro superior: cv. Bing, cuadro inferior: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.....	81

RESUMEN

La cereza es un fruto de gran poder alimenticio y comercial. La firmeza es uno de sus principales atributos de calidad, por lo que esta investigación tuvo como objetivo estudiar la técnica del ultrasonido como medio de medición no destructiva de la firmeza de las cerezas dulces. Para lo cual se diseñó, construyó y probó una configuración ultrasónica, que consistió en un generador, un transductor ultrasónico de 40 kHz en modo pulso-eco, un osciloscopio digital, un módulo de evaluación ultrasónica y una computadora. El ultrasonido se cuantificó como voltaje, la firmeza se determinó con un equipo de prueba de compresión, además se determinó la masa y el diámetro, las mediciones se efectuaron en frutos enteros de dos cultivares de cerezas (cvs. Bing y Regina). A partir de los resultados se propone un modelo de relación lineal múltiple en el que la combinación de voltaje, diámetro y masa puede explicar el 26,9 % de la variación de la firmeza del cv. Regina, también se propone una función cuadrática que describe la correlación positiva estadísticamente significativa entre el diámetro y el voltaje, en ambos cultivares. Se concluye que el voltaje por sí solo, no es evidencia suficiente para predecir la firmeza, aunque es un buen índice para estimar el diámetro.

ABSTRACT

The cherry is a fruit of great alimentary and commercial relevance. Firmness is one of its main quality attributes, which is why the objective of this research was to study the ultrasound technique as a means of non-destructive measurement of the firmness of sweet cherries. An ultrasonic configuration was designed, built and tested, which consisted of a generator, a 40 kHz ultrasonic transducer in pulse-echo mode, a digital oscilloscope, an ultrasonic evaluation module, and a computer. The ultrasound was quantified as voltage, the firmness was determined with a compression test equipment, in addition the mass and the diameter of the fruit were determined, the measurements were made on whole fruits of two cultivars (cvs. Bing and Regina). From the results, a multiple linear relationship model is proposed in which the combination of voltage, diameter and mass can explain 26.9% of the variation in the firmness of the cv. Regina, a quadratic function is also proposed that describes the statistically significant positive correlation between diameter and voltage, in both cultivars. It is concluded that the voltage alone is not sufficient evidence for the prediction of firmness, although it is a good index to estimate the diameter.

1. INTRODUCCIÓN

La cereza es uno de los frutos más apetecibles a nivel mundial debido a los beneficios que proporciona a la salud, llamativa apariencia y sabor característico que la convierten en una especie importante en la economía nacional e internacional (Leiva et al., 2017). El mercado de las cerezas se ha expandido fuertemente en los últimos años debido a la demanda y los precios con las que se transan (Soto, 2017). Del total de fruta producida, las estimaciones indican que un 83 % se destinan a exportación, un 11 % al mercado doméstico, y un 6 % se envían a diferentes plantas de proceso (Figueroa, 2019). Por cierto, las cerezas dulces (*Prunus avium* L.) se consumen principalmente como fruta fresca (Ferreti et al., 2010). Situación que plantea un gran reto que debe contemplar colaboraciones mutuas entre áreas comerciales y científicas, a fin de permitir suministrar productos de mayor calidad a los consumidores tanto de mercados distantes, como en los mercados internos.

Por otra parte, la evaluación de la calidad de los productos agrícolas es un área en continuo desarrollo. Existe una activa demanda para evaluar la calidad de las frutas durante las diversas etapas de desarrollo (crecimiento, maduración, cosecha y almacenamiento). Por consiguiente, productores y distribuidores requieren métodos no destructivos de determinación rápida de parámetros de calidad, lo que hace necesario mejorar los métodos de medición.

Uno de los principales índices de madurez en cerezas es la firmeza (Schmilovitch & Mizrach, 2013), su variabilidad se presenta durante los diferentes estadios de desarrollo en el árbol y luego tras la cosecha los frutos sufren significativas pérdidas que afectan su calidad y precio final. En general este parámetro se determina principalmente por técnicas que miden la fuerza/deformación mecánica al aplicar una fuerza de compresión. Estas técnicas no son muy adecuadas porque son determinaciones de baja velocidad y/o destructivas (Butz et al., 2005), sin embargo, han sido ampliamente utilizadas para medir firmeza en frutos.

Es por estos motivos, que en este estudio se diseñó y construyó un dispositivo de medición de firmeza de cerezas basado en ultrasonidos. Ya que, el ultrasonido se presenta en la literatura como una tecnología que proporciona una técnica no destructiva, rápida y confiable, para correlacionar cambios de calidad durante las diferentes etapas de desarrollo de frutas y verduras (Mizrach, 2008). Además, Butz et al. (2005) revelaron que, en el contexto de los alimentos, aproximadamente el 20 % de las técnicas no destructivas o no invasivas usaban métodos acústicos. Empero, no se han encontrado registros de estudios que utilicen el ultrasonido como método de análisis para determinar la firmeza de cerezas dulce (*Prunus avium* L.). Sin embargo, esta técnica ha sido utilizada en la evaluación de firmeza y de otros parámetros como sólidos solubles totales, acidez titulable, contenido de aceite, materia seca, en manzana, pera y durazno

(Kim et al., 2004), palta (Flitsanov et al., 2000), mango (Mizrach, 2000), tomate (Mizrach, 2007), ciruela (Mizrach, 2004) y manzana (Kim et al., 2009).

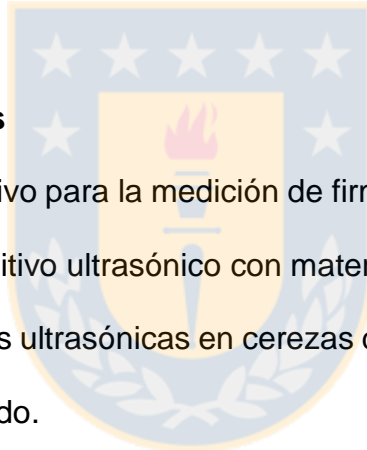
1.1. Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y construir un dispositivo de medición de firmeza de cerezas basado en ultrasonido.

Objetivos específicos

- Diseñar un dispositivo para la medición de firmeza no destructiva de cerezas.
- Construir un dispositivo ultrasónico con materiales livianos y de bajo costo.
- Realizar mediciones ultrasónicas en cerezas dulces cvs. Bing y Regina con el dispositivo construido.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cerezas

2.1.1. Caracterización general

La cereza es el fruto del árbol denominado cerezo. El cerezo común (*Prunus avium* L.) pertenece a la familia *Rosaceae*, género *Prunus* y es originario de la región comprendida entre Asia occidental, norte de África y Europa oriental (Loewe et al., 1997). Botánicamente estos frutos se denominan drupas y están constituidos por el endocarpio, el mesocarpio y el epicarpio. El endocarpio o carozo contiene una semilla simple cubierta por una dura testa, el mesocarpio o pulpa es tejido carnoso generalmente comestible, y el epicarpio o la piel, es lisa y coloreada en un rango que va desde amarillo hasta en algunos casos casi negro (Matte, 1987). Estos tres tipos de tejidos que componen al fruto surgen del ovario, y el aumento en el tamaño del fruto es el resultado de una serie coordinada de divisiones y expansiones celulares (Olmstead et al., 2007). Las cerezas son globosas, a menudo en forma de corazón y redondas. El jugo es rojo, la pulpa es blanda o consistente, dulce, adherente al hueso (Ellena, 2012).

2.1.1.1. Crecimiento y maduración

El aumento del diámetro de la cereza dulce sigue una curva de crecimiento doble sigmoidea, que consta de tres etapas de crecimiento distintas (Coombe, 1976). La primera es básicamente de división celular y comprende desde floración hasta

inicios del endurecimiento del carozo o citogénesis del endosperma, período muy corto que dura entre 10 a 25 días después de la plena Flor (Whiting & Lang, 2004). Se caracteriza por un crecimiento rápido y exponencial de la fruta (Olmstead et al., 2007). En la segunda etapa el crecimiento del fruto es escaso, pero se producen cambios en la semilla como el desarrollo del embrión (Donoso et al., 2007), que coincide con el endurecimiento del endocarpio (Olmstead et al., 2007). En la tercera etapa, debido a la elongación celular se produce un gran crecimiento del fruto (Donoso et al., 2007), ahí ocurre un segundo período de crecimiento exponencial de la fruta que termina con la cosecha o la madurez fisiológica (Olmstead et al., 2007). También en esta última fase, se incrementa la dureza y rigidez del tejido del endocarpio, esto asociado a una pérdida de humedad (Tukey & Young, 1939, citado por Bastías et al., 2014). La firmeza disminuye significativamente, relacionándose inversamente con el aumento de actividad de las enzimas hidrolíticas de la pared celular como la poligalacturonasa (PG), pectinmetilesterasa (PME) y carboximetilcelulasa (Andrews & Li, 1995). Se puede decir, que al igual que otros frutales del género *Prunus*, el tamaño final del fruto está representado, mayoritariamente, por la sumatoria de los crecimientos de las etapas uno y tres (Donoso et al., 2007), como se ejemplifica en la siguiente figura 2.1.

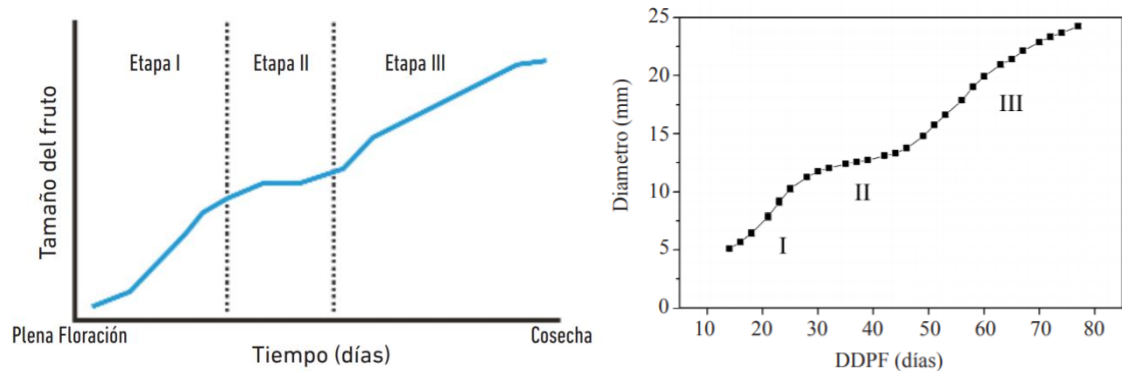


Figura 2.1. Izquierda: curva teórica de crecimiento de fruto doble sigmoidea de frutos de cereza (Fuente: Candan et al., 2017); derecha: patrón de crecimiento del fruto en cerezo 'Bing' en base a diámetro (Fuente: Adaptado de Bastías et al., 2014).

En cerezas, el proceso de maduración está relacionado con un cambio del color verde inicial al rojo, violeta o negruzco, causado por la acumulación de compuestos polifenólicos, antocianinas y degradación de la clorofila (Habib et al., 2017). A medida que la cereza madura en la planta y el color de la piel cambia de rojo claro a oscuro, aumenta, la masa de la fruta, el calibre, el contenido de sólidos solubles, y la relación de sólidos solubles totales (TSS)/acidez titulable (TA). La acidez disminuye y en menor medida lo hace la firmeza (Candan, 2006; Romano et al., 2006; Habib et al., 2017). La firmeza cambia con los cambios en el color de la piel (Mitcham et al., 1998). La disminución de la firmeza es el reflejo de la elongación celular durante el crecimiento del fruto, y se produce una acumulación de compuestos fenólicos totales, que se concentran en la piel y contribuyen a las cualidades sensoriales y organolépticas de las frutas, como el

sabor y la astringencia (Muskovics et al., 2006; Ferretti et al., 2010; Serradilla et al., 2011).

Las cerezas son frutos no climatéricos por lo que la tasa respiratoria y de producción de etileno va disminuyendo a medida que los frutos maduran, se caracterizan por una tasa respiratoria moderada, que varía entre cultivares (Candan, 2006).

2.1.1.2. Cosecha

El momento oportuno de la cosecha o recolección está determinado en función de las características de maduración de cada variedad, de la ubicación geográfica de las plantaciones y de las exigencias de los compradores. Estas exigencias están relacionadas con los componentes de calidad de las cerezas. Como frutos no climatéricos, deben cosecharse una vez que alcanzan las características organolépticas deseadas (Candan, 2006). La cosecha es uno de los aspectos del cultivo que requieren mayor atención, debido a que la cereza presenta un período de madurez y recolección muy corto, entre 10 a 15 días dependiendo de la variedad (Donoso et al., 2007). Algunas recomendaciones importantes son cosechar temprano en la jornada (no cosechar más allá de las 14 horas), no cosechar con lluvia, rocío o temperaturas mayores a 30 ° C. Además, se debe considerar la técnica correcta de recolección, utilizando los dedos como pinzas sobre el pedicelo para extraer la fruta del dardo y evitar la compresión por

acumulación de fruta en la mano y (FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO FRUTÍCOLA, 2010b).

2.1.1.2.1. Características de calidad

Los principales atributos de calidad que influyen en la aceptación del consumidor de las cerezas dulces son el color de la piel, la dulzura (concentración de sólidos solubles), la acidez, la firmeza de la fruta, la masa y el tamaño del fruto (calibre) (Esti et al., 2002; Crisosto et al., 2003; Muskovics et al., 2006; Ferretti et al., 2010).

El color de la piel es uno de los indicadores más importantes de la calidad y madurez de la cereza fresca, y depende de la concentración de antocianinas que varía entre colores claros y oscuros (Esti et al., 2002). La dulzura se debe principalmente a los azúcares como glucosa, fructosa, sorbitol y sacarosa, que se hallan en cantidades elevadas. Los azúcares determinan principalmente el contenido de sólidos solubles en la fruta (Ferretti et al., 2010; Garrido Álvarez, 2012). Aparentemente la aceptación depende de la relación entre las concentraciones de azúcar y ácido (Crisosto et al., 2003). La acidez se debe principalmente a la presencia de ácidos orgánicos siendo el málico el principal ácido orgánico de la cereza (Esti et al., 2002; Usenik et al., 2008).

La firmeza de la fruta se relaciona directamente con la susceptibilidad de la fruta a daños mecánicos durante la manipulación y el envasado (Campoy et al., 2015).

Los cultivares tardíos de cereza dulce son firmes en comparación con los cultivares tempranos, que generalmente son mucho más blandos (Habib et al., 2017). La masa y el tamaño de la fruta son características muy importantes para el valor comercial de las cerezas dulces (Aburto, 2012).

Existen otros parámetros relacionados con la calidad, que no varían en el tiempo, estos son fruto deforme, fruto doble, russet, manchas, herida cicatrizada, golpe de sol, pre-calibre, y falta de color (FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO FRUTÍCOLA, 2010a).

2.1.1.2.2. Características de condición

En la industria frutícola, la condición de la cereza es aquella que reúne a los parámetros que tienen variaciones en el tiempo, como la sobre madurez, fruta blanda, daños mecánicos (pitting y machucón), partiduras, piel de lagarto, pudrición, pedicelo deshidratado y/o pardo, deshidrataciones, etc. (FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO FRUTÍCOLA, 2010a).

2.1.1.2.3. Características nutricionales

La composición de la cereza dulce depende del cultivar, el clima y la etapa de madurez (Mozetič et al., 2006). Las cerezas contienen mayores cantidades de fitocompuestos, en particular de fenoles en comparación con otras frutas, pero con una alta variabilidad entre los diferentes cultivares (Ferretti et al., 2010). La

cereza se caracteriza por ser una fruta rica en fitonutrientes y por tener un bajo índice calórico (Garrido Álvarez, 2012). A este respecto, las cerezas contienen vitaminas hidrosolubles (C, B), liposolubles (A, E y K) y algunos carotenoides, en particular β -caroteno y, en menor medida, luteína y zeaxantina (Ferretti et al., 2010). Las cerezas también contienen minerales como calcio, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, potasio y zinc, entre otros (Ferretti et al., 2010; Leiva et al., 2017). Su consumo produce beneficios a nivel fisiológico, es una fruta rica en compuestos bioactivos con conocidas propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Garrido Álvarez, 2012).

2.1.1.3. Postcosecha

Las cerezas dulces son frutas altamente perecederas, tienen una vida útil de 7 a 14 días en almacenamiento en frío sin tratamientos de conservación. Se ablandan, oscurecen y se producen cambios en el equilibrio ácido-azúcar durante el almacenamiento que afecta el sabor. El ablandamiento o los cambios en la textura de las cerezas durante el almacenamiento influyen en las cualidades organolépticas de la fruta, y a menudo dictan la vida útil (Habib et al., 2017). La característica más frecuentemente asociada con mejorar el potencial de almacenamiento e inducir una mayor resistencia a la descomposición y al daño mecánico es la firmeza de la pulpa (Esti et al., 2002). Sin embargo, estudios han demostrado que la firmeza no siempre está directamente relacionada con la vida útil (Long et al., 2007). Su vida útil como fruta fresca también se acorta por los

cambios de color y sabor, por la decoloración del pedicelo, la desecación y crecimiento de moho. Varios factores, como el tiempo de cosecha, las prácticas adecuadas de manipulación, enfriamiento y el embalaje, influyen en gran medida en la vida útil de las cerezas (Habib et al., 2017). Otras causas del deterioro son la pérdida de peso y de acidez (Bernalte et al., 2003).

También existen otras causas de descarte de la cereza dulce, como la fruta overa, los daños por pájaros, por heladas, por trips, y la fitotoxicidad (por aplicación de productos a campo) (Candan et al., 2017).

2.1.1.4. Variedades

Para describir cada variedad se incluye su origen, posibles sinonimias, época de floración, características del pedúnculo y del fruto. En general se utilizan los descriptores de caracteres de fruto (tamaño, forma, color, sabor, firmeza y resistencia al agrietado) de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS OBTENCIONES VEGETALES, 2006).

En países como España, las variedades más cultivadas en la actualidad son Burlat, Earlise (Early Lory) y Prime Giant, dentro de las variedades tempranas, y Lapins y Sweet Heart dentro de las variedades tardías (Rodrigo, 2018). En China, se plantan decenas de variedades de cerezas, las variedades más cultivadas

comercialmente son europeas, como Brooks, Bing, Rainier, Van y Lapin (PORTAL OFICIAL DE LA FRUTA CHILENA DE EXPORTACIÓN, 2019). En Chile, las principales variedades plantadas desde el año 2010 son Lapins y Santina (Muñoz, 2015). Las 10 principales variedades de cerezas exportadas por Chile en 2019-2020 representan el 94% de la oferta y son Lapins, Santina, Regina, Bing, Sweet Heart, Royal Dawn, Kordia, Skeena, Rainier y Bing 3 (Larrañaga & Osore, 2018; Azcárate et al., 2019; Larrañaga & Osore, 2019a; Larrañaga & Osore, 2019b). Por otro lado, Lapins se consolida como la principal variedad exportada y Santina y Regina se caracterizan por su buen comportamiento de postcosecha. En el caso de Bing disminuyó sus envíos, lo que se debe principalmente a la ausencia de plantaciones nuevas en los últimos tres años. Al igual que en Bing, en las últimas tres temporadas, se observa un estancamiento de la cifra de exportación de Rainier debido a un mínimo crecimiento en la superficie plantada (Azcárate et al., 2019).

Es previsible que en los próximos años aumente el número de nuevas variedades, ya que existen programas de mejoramiento de cerezo, tanto públicos como privados, en países como Alemania, Australia, Bulgaria, Chile, China, España, Japón y Reino Unido. Esta situación está provocando que se encuentre disponible un gran número de variedades tanto tempranas como de media estación y tardías y que se esté ampliando el periodo de cosecha en muchas zonas (Fadón et al., 2017).

2.1.2. Situación de mercado

2.1.2.1. Superficie plantada

Los antecedentes mundiales de la FAO respecto a las plantaciones de cerezo dulce indican que entre el período de 1995 a 2001, hubo un incremento de 16 % (Gámez, 2003). Luego entre 2001 y 2010 se registró un alza de 6,9 % (Bravo, 2012). Posteriormente entre 2010 y 2012 el alza fue leve, registrando un 4,2 %, alcanzando a 401 mil hectáreas (ha) de superficie mundial en el 2012. Ese año Turquía fue el país con mayor superficie plantada a nivel mundial seguido de Estados Unidos. Chile participó con un 3,8%, que lo posicionó en el octavo lugar entre los países con mayor área plantada de cerezos el 2012 (Bravo, 2014). En el año 2017, la superficie mundial cultivada de cerezas fue de 416.445 hectáreas, y los países del hemisferio norte con mayor superficie de cerezos fueron Turquía y Estados Unidos y del hemisferio sur fueron Chile y Australia (Azcárate et al., 2019).

En cuanto a los registros nacionales, estos indican que las plantaciones de cerezos presentaron altas tasas de crecimiento hasta el 2008. Luego, entre 2009 y 2011 disminuyeron ese ritmo para volver a repuntar en el año 2012. Para esos años más del 80% de la superficie nacional plantada de cerezos se encontraba entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule (Muñoz, 2015). La superficie en el año 2017 fue de 25.109 ha (Azcárate et al., 2019) y el 2019 de 38 mil hectáreas ubicadas principalmente en Maule y

O'Higgins, con 17.656 ha, y 13.699 ha, respectivamente. Con menor superficie en cuarto lugar, se encuentra la Región de Ñuble con alrededor de 1.600 ha, seguida por las regiones Araucanía y Biobío, con 1.170 y 539 ha, respectivamente (Larrañaga & Osore, 2019c).

2.1.2.2. Producción

Entre los años 1995 (con 1,6 millones de toneladas) y el año 2000 la producción mundial de cerezas manifestó un aumento de un 4 %. Chile el 2001 bordeó el 2 % de la producción mundial (Gámez, 2003). El 2010 alcanzó al 2,8 %. Dos años después, el 2012 la producción mundial fue de 2,2 millones de toneladas, de las cuales Chile participó con un 4 %, ubicándose como el sexto mayor productor, mientras Turquía fue el primero (Bravo, 2014). En la temporada 2014-2015 Chile se mantuvo en sexto lugar, con una participación del 4,6 % de la producción mundial de cerezas. Años después, el 2018 la producción mundial fue de 2,3 millones de toneladas (Rodrigo, 2018).

2.1.2.3. Exportación

Las exportaciones mundiales aumentaron 19,2 % en volumen en 2014, con respecto al año 2013. El 2014 los principales países exportadores fueron Estados Unidos, Chile, Turquía, China y Grecia (Muñoz, 2015). Hasta la temporada 2016-2017 las exportaciones de Chile y Estados Unidos fueron relativamente similares, sin embargo, a partir de la temporada 2017-2018 las exportaciones de Chile se

apartaron, convirtiéndose en líder exportador de cerezas (iQconsulting, 2020). Últimamente las exportaciones tienen mayor crecimiento desde países del hemisferio sur (+18,6 %) en comparación con el hemisferio norte (+4,8 %) (Azcárate et al., 2019).

Las exportaciones chilenas de cereza han presentado crecimientos constantes, estas tendencias han estado ligadas con los aumentos en la superficie plantada y la entrada de nuevos huertos en etapas productivas crecientes. El 2010 Chile participó con un 13,2 %; el 2012 con 17,3 % y el 2014 con un 20 % del volumen exportado mundial (Bravo, 2014; Muñoz, 2015). De acuerdo con las cifras del Banco Central de Chile, las cerezas pasaron del quinto al segundo lugar de las exportaciones agrícolas. En 2018 se incrementaron las exportaciones de cerezas en 126 % comparado con lo exportado el 2017. Chile representa entre el 93 y 95 % de las cerezas frescas exportadas desde el hemisferio sur. De acuerdo a la información de la asociación de exportadores de fruta fresca de Chile A.G. (ASOEX), durante la temporada 2018-2019 se exportaron alrededor de 180 mil toneladas de cerezas frescas, un 3,5 % menos que el récord de la temporada 2017-2018 (Figuroa, 2019). En la temporada 2019-2020 la exportación de cerezas registró un peak histórico de 228.548 toneladas, 27 % más que en 2018-2019, representando el 94 % de la oferta exportada por el hemisferio sur cuya temporada se desarrolla entre los meses de octubre a marzo (iQconsulting, 2020).

El principal mercado internacional es China. La cuota de mercado en las cerezas importadas en los últimos años se incrementó para Chile en Corea, Taiwán, Federación de Rusia y Hong Kong. Los mercados donde decrece la participación son Países Bajos, Canadá, España, Estados Unidos, Tailandia y Reino Unido (Azcárate et al., 2019).

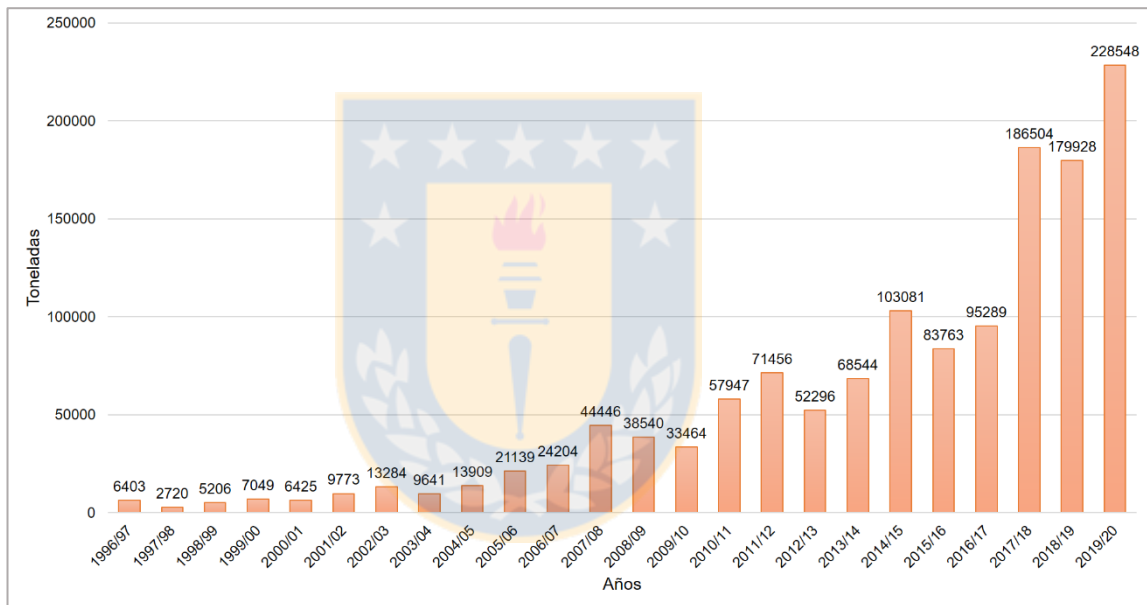


Figura 2.2. Exportación histórica de cereza en Chile (Fuente: Elaboración propia con datos de iQconsulting, 2020).

2.1.2.4. Importación

En el año 2014 la demanda mundial de cerezas frescas en los mercados internacionales fue de 424 mil toneladas. China fue el principal país importador, con una demanda de 28% del comercio mundial de esta fruta. Otros países que demandan gran cantidad de cerezas son Rusia, Alemania y Canadá (Muñoz,

2015). En 2018 Rusia es el país que más cerezas importó (70000 toneladas), seguido de Canadá, Alemania, Hong Kong, China, Austria, Reino Unido y Estados Unidos (Rodrigo, 2018).

2.2. Importancia de la firmeza como atributo de calidad de cerezas

2.2.1. Características generales

La firmeza también es uno de los principales parámetros para estimar el grado de madurez de un fruto de cereza (López, 2003). Al igual que sucede con otros parámetros, las exigencias de firmeza dependen del mercado al cual se destine la fruta (Candan, 2006). Stanich et al. (2016) sugieren que los valores de firmeza dependen del cultivar, la fecha de cosecha, el tiempo de almacenamiento, entre otros. Los horticultores tienden a definir la firmeza como la fuerza máxima que puede soportar el producto. Mientras que los ingenieros de materiales a menudo usan la pendiente de la curva de fuerza/deformación, que refleja el módulo elástico aparente, como un índice de firmeza (Schmilovitch, & Mizrach, 2013).

2.2.2. Determinación de firmeza en cerezas

La determinación de firmeza en cerezas es compleja, pues los equipos más efectivos para tal fin son muy caros o no son portátiles (Candan, 2006). Durante las últimas décadas se ha utilizado distintas técnicas e instrumentos para determinar la firmeza de cerezas, tanto así que muchos investigadores indican que no existe un método estándar, asimismo la cuantificación es diversa en

valores y unidades. Existen muchos estudios donde la firmeza de cerezas se ha determinado utilizando analizadores de textura, ejemplo de ello es Muskovics et al. (2006) que consiguieron durante la última fase de crecimiento de la fruta un valor constante de 1 - 1,5 N mm⁻¹, Martínez-Romero et al. (2006) reportaron valores dentro del mismo rango para un fruto maduro, Balas et al. (2019) reportaron valores medios de 1,73 y 1,54 N mm⁻¹ y López-Ortega et al. (2016) expresaron sus resultados como gramo-fuerza por milímetro de deformación (gf mm⁻¹). Otros estudios donde también se ha utilizado el mismo equipo son los escritos por Dzedzic et al. (2016), Giménez et al. (2016), Aglar et al. (2017), Dzedzic et al. (2017), Giménez et al. (2017) y Dong & Wang (2018). Por otro lado, está la máquina de ensayo universal Instron que fue utilizada por Bernalte et al. (2003), informando la fuerza de punción en N, y el dispositivo de prueba universal Zwick Z0.5 que fue utilizado por Ozkan et al. (2016) y Saracoglu et al. (2017), determinando la fuerza máxima aplicada para penetrar en la fruta, expresando resultados en N y N mm⁻¹, respectivamente. Otros instrumentos para medir firmeza es el durómetro digital Durofel utilizado por Kappel et al. (1996), Campoy et al. (2015) y Belge et al. (2017), cuyos resultados son en unidades Durofel (1, sin resistencia - 100, resistencia máxima), y el probador de firmeza de fruta FirmTech2, usado por Stanich et al. (2016) y Zhou et al. (2016), los cuales informaron sus resultados en N mm⁻¹ y en g mm⁻¹, respectivamente.

Utilizar el analizador de textura implica, en la mayoría de los casos, el uso de una sonda de placa plana, que, para las investigaciones recién mencionadas, ha sido

de diferentes diámetros. La punta, aguja o vástago, es utilizada para aplicar compresión en la mejilla del fruto. Acerca de la determinación con Durofel, su medición se basa en cuantificar la fuerza necesaria para retraer el émbolo al aplicarlo en forma manual contra la superficie de la fruta dando una idea de la firmeza a través de la deformación del mismo. Mientras que al usar Firmtech, la medición se basa en ejercer una fuerza conocida y calibrada hasta generar la deformación en 1 mm de la superficie de la fruta (Defilippi & Manríquez, 2011). Por otra parte, Mitcham et al. (1998) mencionan la utilización de otros dos instrumentos de medición de firmeza, estos son el MTG (Momentum Transfer Generator), que evalúa la firmeza mediante la transferencia del momento de una fruta impactante a un disco sujeto a la bobina de un altavoz de audio con soporte de resorte. Y el Impactador de baja masa que implica el impacto de un pequeño objeto esférico de baja masa en la mejilla de la fruta, incluye un pequeño acelerómetro montado detrás de la masa que suministra a una computadora interconectada la señal de respuesta al impacto. Por otra parte, Rojas y Radrigán (2014) informan de un instrumento denominado Cherry-tex CV2.0 cuya correlación de firmeza respecto del uso del equipo Firmtech (FirmTech Fruit Firmness, BioWorks Inc., Wamego, USA) es 0,9986. El mismo se caracteriza por determinar la resistencia mecánica a la deformación de frutos después de la aplicación de una presión máxima a una velocidad controlada a través de un vástago cilíndrico (Hirzel et al., 2018).

2.3. Ultrasonido

2.3.1. Definición y fundamentos de la tecnología de ultrasonido

El ultrasonido o ultrasónico es una onda de sonido a una frecuencia que excede el límite de audición del oído humano (Awad et al., 2012; Chen et al., 2020), es decir, son ondas de sonido por encima de 20.000 Hercios (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Se puede decir que es una forma de energía vibracional producida por un transductor de ultrasonido que convierte la energía eléctrica en energía acústica (Shung et al., 2007).

En todo el alcance de sus aplicaciones, el ultrasonido se genera de la misma manera (Mizrach, 2008). Para explicar el ultrasonido, primero se debe entender el efecto piezoeléctrico, cuya etimología del concepto piezoeléctrico tiene origen en el griego, donde “*piezein*” significa apretar o estrujar, y eléctrico de electrón. En términos muy generales podemos decir que el efecto piezoeléctrico es el que aparece en algunos materiales (principalmente algunos cristales y cerámicas), al aplicarles una carga mecánica estos reaccionan generando una carga eléctrica, se trata de un fenómeno bidireccional, por lo que al aplicarles un campo eléctrico estos materiales presentan deformaciones físicas (Martín, 2018). En la figura 2.3 izquierda, al aplicar una fuerza mecánica sobre el material se induce una diferencia de potencial, ilustrado con una bombilla, esto representa al efecto directo. En la figura 2.3 derecha, se muestra el efecto inverso en un prisma cuadrangular piezoeléctrico, donde se puede observar que, aplicando una

tensión alterna, este material está en compresión (la línea discontinua) o tracción (la línea continua), en función del semiciclo en el que se encuentre esta señal alterna haciendo que el material vibre. A partir de esas vibraciones se puede obtener el fenómeno físico conocido como ultrasonido (Ruiz, 2018).

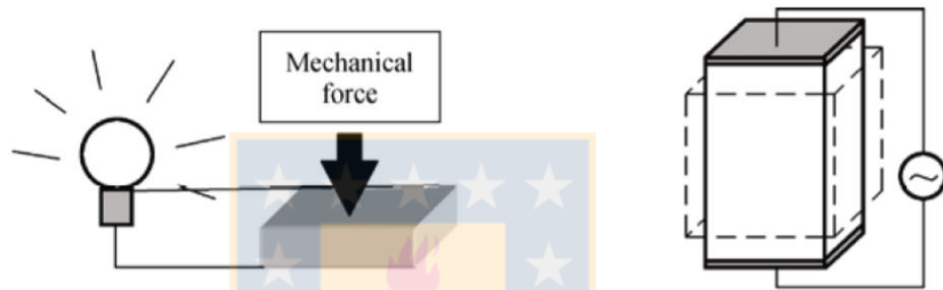


Figura 2.3. Efecto piezoeléctrico directo (izquierda) e inverso (derecha). Fuente: Martín (2018).

Entonces el ultrasonido es generado por un transductor que contiene un cristal cerámico que es excitado por un pulso eléctrico corto con una forma típica de varias oscilaciones sinusoidales. A través del efecto piezoeléctrico, esta energía eléctrica se convierte en una onda mecánica que se propaga como un pulso sónico corto a la frecuencia fundamental del transductor. La energía luego se transfiere al material o cuerpo bajo análisis y se propaga a través de él (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). La señal de ultrasonido que emerge del espécimen de prueba es detectada por un elemento piezoeléctrico que actúa

como un receptor, convirtiendo cualquier vibración ultrasónica que lo incida en energía eléctrica.

Cuando el sistema funciona en modo de pulso-eco, el mismo elemento piezoeléctrico actúa como transmisor y receptor alternativamente. En el modo de transmisión directa, un segundo elemento piezoeléctrico actúa como receptor (Mizrach, 2008; Schmilovitch & Mizrach, 2013). La energía ultrasónica se propagará a través de un material hasta que la onda de sonido encuentre un cambio de impedancia (una resistencia al paso del sonido), causado por algún cambio en la densidad del material y/o la velocidad de la onda de sonido. Esto puede ocurrir dentro del material, cuando la naturaleza del tejido cambia o hay un vacío o reflector presente. Parte de la energía del sonido se refleja, y la cantidad reflejada depende del cambio de impedancia y/o del tamaño del reflector. Si no hay reflectores internos, la onda continuará hasta que llegue al lado más alejado del objeto de prueba, o hasta que la energía esté totalmente atenuada (Kuttruff, 1991).

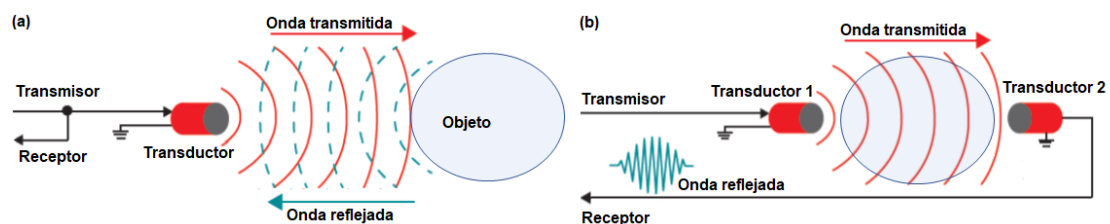


Figura 2.4. Funcionamiento, modo pulso-eco (a), modo transmisión directa (b). Fuente: Elaboración propia.

Dado que cualquier tipo de sonido, solo puede propagarse en un medio material y está fuertemente influenciado por ese medio, la velocidad del sonido, así como su atenuación, dependen de manera característica de la naturaleza del medio. Por lo tanto, si estas cantidades se conocen por medición, se pueden sacar conclusiones con respecto a las propiedades físicas del medio (Kuttruff, 1991). Ya que, la mayoría de los cambios físicos o químicos en el material provocan la alteración de la atenuación y la velocidad del haz propagado (Schmilovitch & Mizrach, 2013).

Los fenómenos físicos y químicos asociados con las frecuencias de ultrasonido incluyen agitación, vibración, presión, ondas de choque, fuerzas de corte, microchorro, compresión y dispersión, flujo acústico, cavitación y formación de radicales libres (Feng et al., 2011).

Awad et al. (2012), realizaron una clasificación del ultrasonido basada en el rango de frecuencia, mencionando que se puede dividir en baja y alta energía. El ultrasonido de baja energía (baja potencia, alta frecuencia), utiliza intensidades inferiores a 1 W cm^{-2} a frecuencias superiores a 100 kHz, proporciona técnicas no invasivas, baratas y simples, que pueden usarse para estimar la composición de los alimentos, monitoreando las propiedades fisicoquímicas y estructurales, detectar contaminación por metales y otros materiales extraños. Por otro lado, estos autores expresan que el ultrasonido de alta energía (alta potencia, baja frecuencia), utiliza intensidades superiores a 1 W cm^{-2} en frecuencias entre 20 y

500 kHz, que son perjudiciales y modifican las propiedades de los alimentos al inducir cambios mecánicos, físicos y químicos/bioquímicos a través de la cavitación.

El fenómeno de la cavitación (latín *cavus* = cavidad) se refiere a la aparición de micro cavidades de vapor que se nuclean en la superficie de una estructura que contiene una sustancia líquida bajo la influencia de variaciones de presión de determinada frecuencia e intensidad. Si las burbujas se localizan cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido, al aplastar la cavidad dejada por el vapor (aspiración en vacío), dan lugar a presiones localizadas tan altas que ocasionan daños en la superficie sólida. La cavitación puede dañar casi cualquier material (Calderón et al, 2019). Desde otra perspectiva, Feng et al. (2011) expresan que en el rango de frecuencia más alto (200 - 500 kHz), el efecto químico domina debido a la gran cantidad de burbujas activas, mientras que en el rango de frecuencia más bajo (20 - 100 kHz) los transitorios físicos dominan con niveles de cavitación transitorios más altos. Exponiendo que el ultrasonido de diagnóstico tiene una frecuencia superior a 1 MHz y se utiliza principalmente para fines de imagenología médica e industrial.

Sarkar y Wolfe (1983) sugirieron que una frecuencia más baja y una mayor potencia de radiación acústica podría ser beneficiosa en las pruebas no

destruictivas de frutas y verduras frescas. Es así como, Mizrach et al. (1989) aplicaron frecuencias más bajas y modificaron un dispositivo de ultrasonido de alta potencia y baja frecuencia, originalmente diseñado para una aplicación industrial, para mediciones en especímenes agrícolas muy atenuantes y utilizaron transductores de 50 y 100 kHz. Aunque, Mizrach (2008) y Schmilovitch y Mizrach (2013) sugieren que, a altas frecuencias y baja potencia, puede usarse como una herramienta analítica y de diagnóstico, y a muy alta potencia puede ayudar al procesamiento, similar a lo relatado por Awad et al. (2012).

2.3.1.1. Parámetros asociados al ultrasonido

El ultrasonido se rige por las mismas leyes físicas que todos los demás fenómenos acústicos. Del mismo modo, los conceptos y términos aplicados en ultrasonidos son en general los mismos que en acústica general (Kuttruff, 1991). Las ondas sonoras son vibraciones mecánicas que viajan a través de un medio, que en este caso es un sólido, la propagación de las ondas a través de este sólido, es a una velocidad específica, dirección predecible y, cuando las ondas encuentran un límite con un medio distinto y con diferente impedancia mecánica, las ondas se reflejarán o se transmitirán según reglas conocidas (Santos et al., 2005). La impedancia Z del medio conductor de ondas ultrasónicas se define mediante la siguiente expresión:

$$Z = \rho v \quad (2.1)$$

La impedancia de dos medios diferentes origina la reflexión, así como la transmisión y la amplitud de la onda, siendo útiles las siguientes relaciones:

Índice de reflexión:

$$I_R = \frac{(z_1 - z_2)^2}{(z_1 + z_2)^2} \quad (2.2)$$

Índice de transición:

$$I_t = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2} \quad (2.3)$$

Las amplitudes del haz incidente con el reflejado son:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \quad (2.4)$$

Velocidad del sonido:

La velocidad del sonido V , en un medio homogéneo está directamente relacionado con el módulo de elasticidad, densidad del material, módulo de Poisson, y el grado de homogeneidad. Según el tipo de onda la velocidad también es diferente. La velocidad se relaciona con la longitud λ y frecuencia f de onda como sigue:

$$V = \lambda f \quad (2.5)$$

o,

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (2.6)$$

donde:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.7)$$

Según la velocidad del sonido, la distancia recorrida por éste es:

$$s = \frac{VT}{2} \quad (2.8)$$

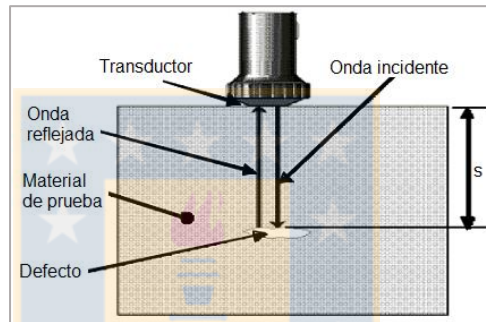


Figura 2.5. Se muestra como una onda ultrasónica es reflejada al encontrarse con un defecto en el interior del material de prueba (Fuente: Adaptado de Santos et al., 2005).

Frecuencia:

Todos los materiales tienden a actuar hasta cierto punto como un filtro al paso de la onda, atenuando o dispersándolo. Las ondas del sonido oscilan a una frecuencia específica, esto es, número de vibraciones o ciclos por segundo.

Longitud de onda:

Cualquier tipo de onda tendrá una longitud asociada a la distancia entre dos puntos correspondiente de un ciclo de onda. La longitud de onda se relaciona con su frecuencia y su velocidad por la ecuación 2.5.

2.3.1.2. Ventajas y desventajas

El ultrasonido tiene ventajas como ser no destructivo, rápido, relativamente barato, simple y de bajo requerimiento de energía, además, también destaca que es aplicable a alimentos como frutas y verduras para determinar propiedades de textura relevantes como la firmeza. Aunque, sus desventajas son el conocimiento limitado de las respuestas de los tejidos de frutas y verduras a las ondas ultrasónicas y la falta de equipos o componentes adecuados (Chen y Opara, 2013).

2.3.2. Aplicaciones de ultrasonido

Como ya se ha mencionado, sus principales áreas de aplicación son diagnósticos médicos, procesos industriales y procedimientos de inspección.

2.3.2.1. Ultrasonidos para análisis de frutas y verduras

Se han reportado intentos de penetrar muestras de frutas con ondas ultrasónicas para detectar heterogeneidades tisulares, como discontinuidades, huecos, fosas (semillas o piedras), materiales extraños, hematomas, podredumbres o descomposición interna (Mizrach, 2008).

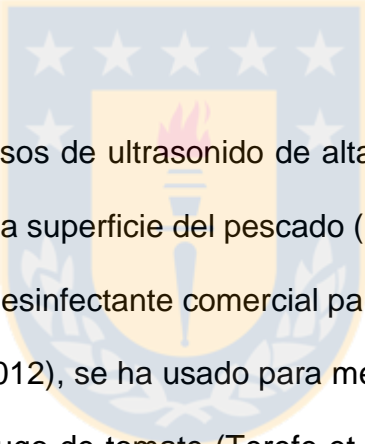
Una revisión efectuada por Mizrach et al. (2008) manifiesta que durante décadas se ha estudiado el uso de la tecnología ultrasónica para la evaluación de calidad de frutas y hortalizas frescas, en proceso previos y posteriores a la cosecha, entre estas investigaciones, aquellas que han evaluado la firmeza, han utilizado tanto

muestras de tejidos, como frutos enteros. Por ejemplo, Kim et al. (2004) utilizaron muestras cilíndricas de la pulpa del fruto, de 45 mm de diámetro de varias longitudes, midieron el ultrasonido con el modo de transmisión, y la dureza, como el módulo elástico y la resistencia al bioproducto, por compresión. Proponiendo modelos de regresión multilínea que describen la relación entre las propiedades mecánicas y los parámetros ultrasónicos. Informaron coeficientes de correlación de 0,792, 0,730 y 0,542 en manzana, pera y durazno, respectivamente, tanto para la resistencia al bioproducto como para el módulo elástico.

Se han realizado mediciones ultrasónicas en frutos enteros, como palta (Flitsanov et al., 2000; Mizrach, 2000; Mizrach et al., 2000), mango (Mizrach et al., 1999; Mizrach, 2000), tomate (Mizrach, 2007), ciruela (Mizrach, 2004) y manzana (Bechar et al., 2005; Kim et al., 2009). De tal modo que, Flitsanov et al. (2000), obtuvieron que la atenuación ultrasónica se relacionó negativamente con la firmeza de la fruta almacenada y con su etapa de maduración, hallando una buena correlación entre los cambios de firmeza durante el proceso de maduración y las mediciones de atenuación ultrasónica para diferentes muestras de palta. De manera similar, Mizrach (2004), al analizar las mediciones ultrasónicas junto con mediciones destructivas de la firmeza de ciruela, no pudo observar una correlación entre la atenuación y la firmeza al comienzo del proceso de ablandamiento, pero al final durante las 78-151 h después de su entrada en almacenamiento encontró una alta correlación ($R^2 = 0,7156$).

2.3.2.2. Otras aplicaciones en la industria alimentaria

En la industria alimentaria el ultrasonido ha sido estudiado en diversas aplicaciones. El ultrasonido de baja potencia para análisis y control de calidad de productos cárnicos, de vegetales y de otros productos alimenticios. Y el ultrasonido de alta potencia que se utiliza en algunos procesos alimentarios, en enzimas alimentarias, en inactivación microbiana y en extracción de bioactivos alimentarios y también en productos alimenticios congelados y secos (Awad et al., 2012).



Algunos ejemplos de usos de ultrasonido de alta potencia en la última década, son la desinfección de la superficie del pescado (Pedrós-Garrido et al., 2017), se ha combinado con un desinfectante comercial para reducir microbios en tomates (São José & Dantas, 2012), se ha usado para mejorar la tasa de inactivación de la PG y la PME en el jugo de tomate (Terefe et al., 2009), en desensibilización (Zhang et al., 2018), en curación para promover la uniformidad de la distribución de cloruro de sodio (NaCl) en trozos de carne (González-González et al., 2017), se ha usado para esterilización de fresas y lechugas recién cortadas y en ablandamiento para mejorar la suavidad de productos cárnicos (Chen et al., 2020) y para mejorar la ternura de la carne durante la cocción (Zou et al., 2018).

2.3.3. Ultrasonido y cerezas

Se ha encontrado que durante los últimos años se ha utilizado la tecnología de ultrasonido para realizar diversos estudios en cerezas. Entre estos está, Bal y Torçut (2020), en el cual estudiaron los efectos del ultrasonido y el ácido salicílico solos y en tratamientos combinados sobre la calidad de la fruta y el almacenamiento, en cereza dulce, también se encontró que Muzaffar et al. (2016) trataron cerezas con ondas ultrasónicas (33 kHz, 60 W) a diferentes intervalos de tiempo y descubrieron que el tratamiento con ultrasonido en cereza es efectivo para mantener y mejorar el color, el pH, el TSS y la firmeza de la fruta durante el período de almacenamiento de 15 días. Otros usos en cerezas, han sido para realizar extracciones asistidas por ultrasonido, como, por ejemplo, Oancea et al. (2013) lo utilizaron para extraer antocianinas de cerezas, Aires et al. (2017) extrajeron el contenido fenólico de tallos de cereza dulce, Piccolette et al. (2018) obtuvieron un extracto acuoso de los frutos de cereza dulce y Acero et al. (2019) en donde se ayudaron de un baño ultrasónico para obtener extractos y caracterizar el perfil fitoquímico de cerezas dulces.

No se encontraron antecedentes bibliográficos respecto a la utilización de la tecnología de ultrasonido para análisis no destructivo de las características de calidad de cerezas.

3. METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo, se especifica la metodología empleada en la presente tesis para desarrollar el dispositivo de medición de cerezas basado en ultrasonido. El trabajo se presentará en dos etapas, la primera hace alusión al proceso de diseño y construcción del dispositivo, y la segunda relata el testeo realizado en cerezas. Los trabajos prácticos de las dos etapas fueron realizados en el laboratorio del Centro de Desarrollo Tecnológico Agroindustrial (CDTA) de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción campus Chillán.

3.1. Diseño y construcción del dispositivo

3.1.1. Diseño

3.1.1.1. Consideraciones iniciales

Caracterización de cereza:

Las cerezas son globosas, a menudo en forma de corazón y redondas (Ellena, 2012). El rango de calibre varía entre chico (< 22 mm) y super Giant (> 32 mm) (Raffo et al., 2013).

Proyecciones de uso del dispositivo y restricciones de muestreo:

La proyección del dispositivo definitivo fue para realizar mediciones en el diámetro máximo de la sección ecuatorial de cerezas de las distintas ramas del

árbol, sin dañar el fruto. Por lo que, debe ser un dispositivo de pequeñas dimensiones, liviano, de fácil manipulación por el operador, y que la toma de datos sea rápida, de modo que permita medir gran cantidad de cerezas en una jornada. El presente trabajo fue la primera versión en el desarrollo de un dispositivo para la medición de firmeza mediante ultrasonido.

Selección de la tecnología ultrasonido:

La firmeza se ha determinado mediante métodos mecánicos durante décadas, los instrumentos de pruebas de compresión que se han utilizado tienen en común ser destructivos, en algunos casos no desde la primera medición, sino que desde mediciones repetitivas. Desde otra perspectiva Mizrach (2008), ha señalado que la firmeza es la propiedad mecánica más importante que se correlaciona con las características de ultrasonido. Por estas razones se decidió estudiar la tecnología de ultrasonido para estimar la firmeza de cerezas de manera no destructiva.

3.1.1.2. Parámetros técnicos

Frecuencia del transductor:

Se utilizará un transductor de 40.000 hercios (Hz) o 40 kHz de frecuencia base o fundamental, valor con el cual determinamos que el período de la señal T será 0,000025 segundo (s) o, 25 μs .

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40000} = 25 \times 10^{-6} [s] \quad (3.1)$$

Frecuencia de muestreo:

Un fruto de cereza tiene entre 18 y 36 milímetros (mm) de diámetro ecuatorial, considerando para el cálculo al fruto más pequeño, es decir, a 18 mm le quitamos un aproximado de 5 mm relacionado al endocarpio, por lo tanto, obtenemos aproximadamente 6,5 mm de pulpa (mesocarpio más epicarpio), por cada lado del carozo. Luego para un solo lado, estimando lograr 10 datos para obtener un promedio, entonces se necesita un dato cada 0,65 mm, nuevamente aplicando la ecuación de velocidad, y la velocidad del sonido V_{son} en el aire (a una temperatura de 20 °C), se obtiene:

$$T = \frac{\lambda}{V_{son}} = \frac{0,65 [mm]}{343200 \left[\frac{mm}{s} \right]} = 1,89 \times 10^{-6} [s] \quad (3.2)$$

Por lo tanto, se necesita un dato cada 1,89 μs . Según los cálculos siguientes, la frecuencia de muestreo necesaria es de 528 kHz:

$$f_{muestreo} = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,89 \times 10^{-6} [s]} = 528 \times 10^3 [Hz] \quad (3.3)$$

Selección de hardware:

Para elegir los materiales necesarios de un sistema ultrasónico, se investigó aquellos estudios científicos que utilizaron la técnica de ultrasonido para análisis de frutos durante las últimas cuatro décadas. En base a esta investigación, se determinó que se pueden realizar diferentes arreglos para generar, recibir y procesar ondas de ultrasonido, no obstante, los componentes fundamentales son cuatro, es decir, un generador de ondas, un transmisor y receptor, un microprocesador o computadora y una pantalla.

3.1.2. Construcción del dispositivo

3.1.2.1. Configuración de laboratorio

La disposición de los elementos constó de un generador (GW INSTEK, Modelo GFG-8216A) conectado a la placa o tarjeta de evaluación TDC1000-C2000EVM (Texas Instruments). Al mismo tiempo, un cable conectó la computadora (sistema operativo Windows 7) desde el puerto USB a la entrada mini USB 2.0 (J2) de la placa TDC1000-C2000EVM. Previa instalación del controlador TUSB3410, esta conexión permitió la alimentación y la transmisión de instrucciones a la tarjeta, desde la interfaz gráfica de usuario (GUI), ejecutable en la computadora. Por otro lado, para transmitir y recibir la onda ultrasónica, desde el transductor ultrasónico de frecuencia base de 40 kHz, montado en un pequeño soporte (soporte 1), se conectó a través del conector J5 de la tarjeta TDC1000-C2000EVM en las entradas de emisor (TX1), receptor (RX2) y tierra (GND). Asimismo, las puntas

de prueba del canal de entrada (CH1 o CH2) del osciloscopio (GW INSTEK, Modelo GDS-1052-U, DC-50 MHz (-3dB)), fueron conectadas a los pines TX1 y RX2, en ambos casos con su respectiva conexión a masa (GND), como se observa en la siguiente figura.

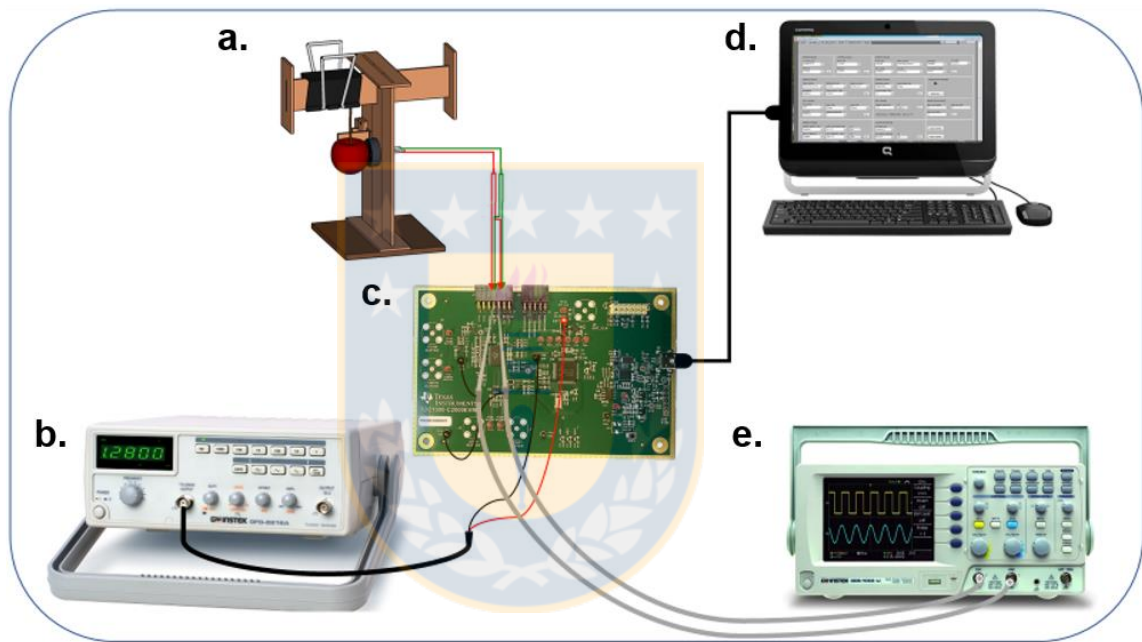


Figura 3.1. Configuración de laboratorio para la medición ultrasónica en cereza dulce. a. Soporte 1, b. Generador de funciones, c. TDC1000-C2000EVM, d. Computadora y e. Osciloscopio digital. Fuente: Elaboración propia.

Características del TDC1000-C2000EVM:

Es un módulo que permite evaluar el funcionamiento y el rendimiento del analógico de extremo frontal (AFE) ultrasónico TDC1000 con el microcontrolador C2000 (TMS320F28035PAGS) incorporado para procesar datos. El TDC1000 puede configurarse para múltiples pulsos y frecuencias de transmisión. La GUI

del TDC1000-C2000, permite personalizar, configurar y controlar la configuración ultrasónica.

Características de TDC1000:

- Corriente de funcionamiento de 1,8 μ A
- Soporta aplicaciones de transductor simple o doble
- Excitación programable desde 31,25 kHz a 4 MHz, hasta 31 pulsos
- Frecuencia de operación: mínima 0,06 MHz, máxima 16 MHz

Características de TMS320F28035:

- CPU de 32 bits de alta eficiencia
- Frecuencia de 60 MHz (ciclo de instrucción, mín. 16,67 ns, máx. 500 ns)
- Baja potencia
- Resolución ADC de 12 bits
- Suministro único de 3.3 V

Configuración del generador de funciones:

Una vez encendido el generador, previa conexión a la fuente principal utilizando el cable de alimentación AC, se seleccionó la forma de onda senoidal, a continuación se seleccionó el rango de frecuencia de 1M (para frecuencias desde 300 kHz hasta 3 MHz), luego se ajustó la frecuencia girando la perilla en sentido horario hasta llegar a 1,28 MHz (leída desde la ventana de visualización), en ese

momento se conectó la salida con el cable de prueba BNC al pin del reloj externo de la tarjeta TDC1000-C2000EVM. Esta configuración no fue necesaria para el uso del transductor de 1 MHz.

Configuración del osciloscopio:

Con el equipo ya encendido y teniendo activado el canal de entrada con las teclas CH1 y/o CH2, aparece en el lado izquierdo de la pantalla el indicador de canal (como se observa en la Figura 3.2), en seguida se conectó la señal de entrada al osciloscopio utilizando la sonda (GW INSTEK GTP-070B-4), ajustada al factor de atenuación x10. Luego para ver la forma de onda en el centro del monitor (de 10 divisiones horizontales x 8 divisiones verticales), se seleccionó la función automática Autoset o bien se realizó una búsqueda manual de la forma de onda, girando el mando de posición horizontal hacia la izquierda o derecha, y girando el mando de posición vertical hacia arriba o abajo (cada canal por separado), identificada la forma de onda, se ajustó el nivel de disparo o trigger si la forma de onda es inestable. A continuación, se cambió la escala, para seleccionar la base de tiempo (escala horizontal), se utilizó el mando TIME/ DIV, izquierda (lento) o derecha (rápido), el rango utilizado fue $2,5 \mu\text{s}/\text{div} \sim 1 \text{ ms}/\text{div}$, para seleccionar la escala vertical, se utilizó el mando VOLTS/ DIV, izquierda (abajo) o derecha (arriba), el rango utilizado fue de $50 \text{ mV}/\text{div} \sim 1 \text{ V}/\text{div}$.

Posteriormente se midió el voltaje con el cursor vertical (Y1 e Y2), donde los parámetros medidos son: Y1 = nivel de voltaje del cursor superior; Y2 = nivel de

voltaje del cursor inferior; $Y1Y2$ = la diferencia entre cursor superior e inferior, con mayor énfasis en este último.



Figura 3.2. Descripción de la pantalla del osciloscopio. Fuente: Elaboración propia.

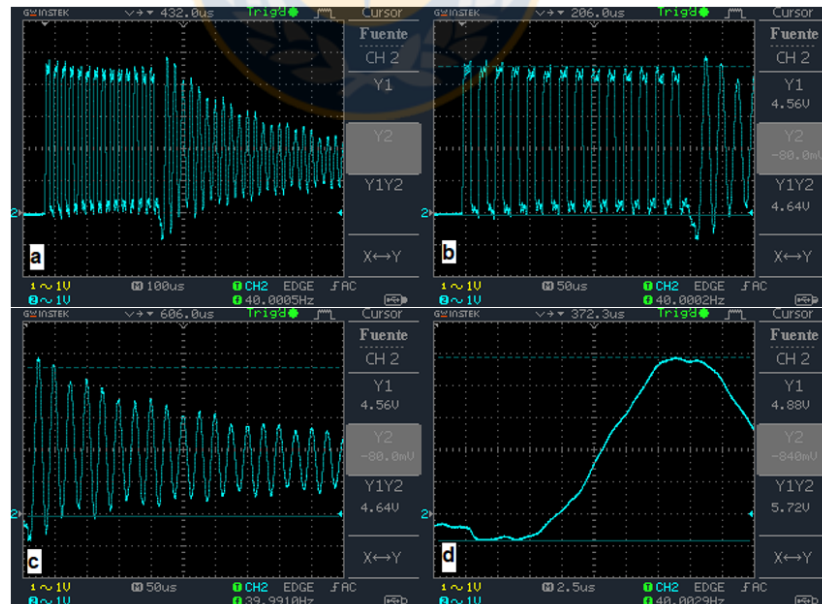


Figura 3.3. Señal ultrasónica de forma de onda sinusoidal de distinto rango en el eje horizontal: a = 100 μ s/div; b y c = 50 μ s/div; d = 2,5 μ s/div. Sensibilidad en el eje vertical: a, b, c, y d = 1 V/div. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2. Prueba de configuraciones de la GUI

Para obtener la personalización más acertada de la interfaz gráfica de usuario de la tarjeta TDC1000-C2000EVM se realizó pruebas reiteradas hasta alcanzar estabilidad en la señal emitida y recibida. Para la configuración del equipo se utilizó el tiempo de vuelo (TOF) que posee la GUI, el registro de configuración de la GUI (véase Anexo 7.1), el osciloscopio y materiales de prueba de distinta densidad como madera (palos de helado), esponjas y mandarinas.

Se analizaron distintas configuraciones, variando múltiples parámetros, principalmente aquellos que más influían en la estabilidad, tamaño y forma de la onda, como:

- Divisor de frecuencia para reloj
- Números de pulsos TX en una ráfaga (desde 0 hasta 31 pulsos)
- Amortiguación
- Reducción de potencia
- Control del amplificador de ganancia programable (PGA)
- Control del amplificador de bajo ruido (LNA)
- Control de tiempo de espera de recepción de eco

La selección de fuente del reloj se configuró en reloj externo (EXT CLK (1,28 MHz)) para el transductor de 40 kHz, con un divisor de frecuencia programado en 32. Y en reloj interno (ON BOARD OSC: 8 MHz) para el transductor de 1 MHz, con un divisor de frecuencia programado en 8. Mientras que la actualización del trigger se estableció en 100 ms, en todos los casos. Ver figuras 3.4 y 3.5.

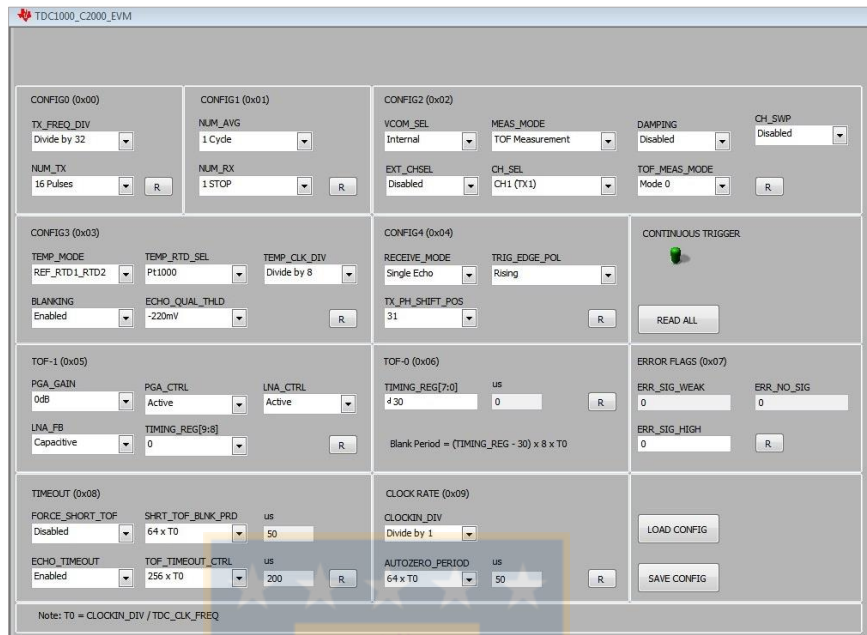


Figura 3.4. GUI del TDC1000C2000EVM, sección TDC1000. Fuente: Elaboración propia.

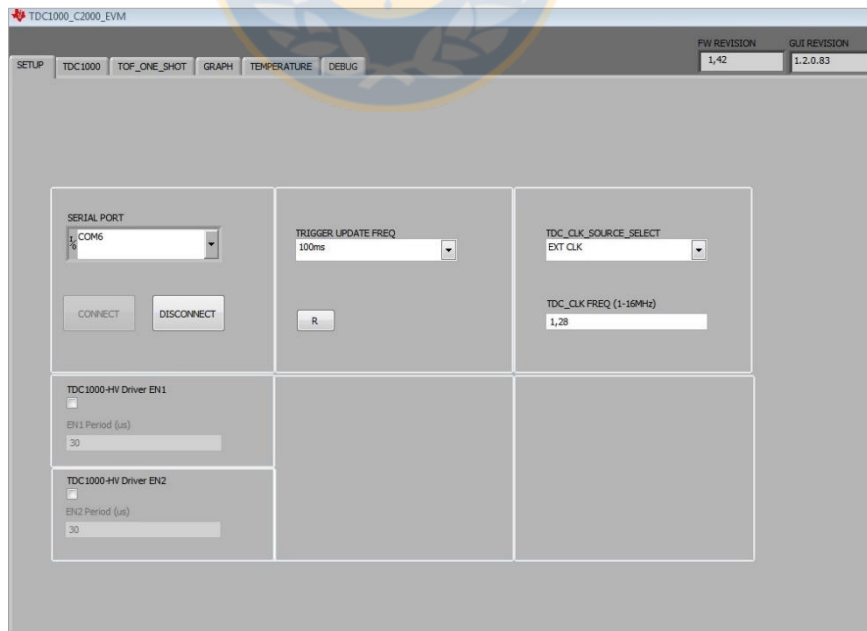


Figura 3.5. GUI del TDC1000C2000EVM, sección SETUP. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.3. Prueba de transductores

Se realizaron pruebas ultrasónicas utilizando tres montajes, dos con 2 transductores de 40 kHz (TM-1625H12T/R, China), de diámetro de 16 mm, en ángulos de 90 y 120 grados, en modo de transmisión, y una prueba con un solo transductor que trabaja en modo pulso eco, es decir, el mismo transductor que emite el pulso ultrasónico es el que recibe los ecos generados por la interacción del ultrasonido con el medio a interrogar. Las otras partes de la configuración consisten en los elementos utilizados en la configuración la sección 3.1.2.1.

Se realizaron pruebas ultrasónicas en modo pulso eco con el transductor disco cerámico piezoeléctrico de frecuencia de resonancia de $1 \text{ MHz} \pm 3\%$ (SMD15T21R111WL, STEMiNC, USA), de 15 mm de diámetro y 2,1 mm de grosor. En este caso se utilizó la mayoría de los elementos de la configuración de laboratorio de la sección 3.1.2.1. (Figura 3.1), con las siguientes dos excepciones:

- La tarjeta TDC1000-C2000EVM generó de manera autónoma la señal de 1 MHz, por lo que no fue necesario el uso del generador externo.
- El transductor de 1 MHz (Figura 3.6) se utilizó en lugar del transductor de 40 kHz.

El soporte 2 contuvo una pared inferior fija donde va montado el transductor, mientras que la pared superior se ajusta de acuerdo con el tamaño del fruto, para

realizar las lecturas ultrasónicas se aplicó una pequeña presión al fruto entre ambas paredes. Esta presión es de magnitud desconocida y es variable de acuerdo a la forma de cada fruto.

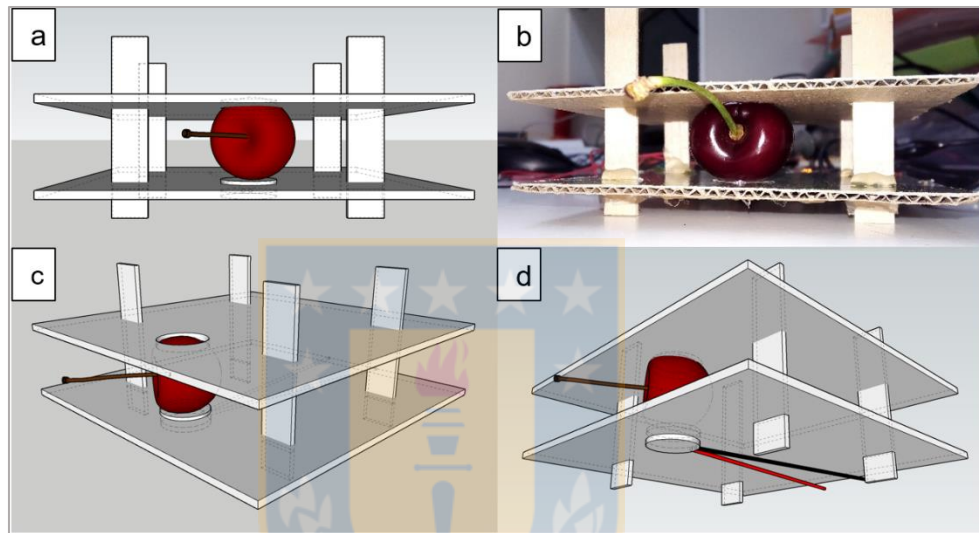


Figura 3.6. Soporte 2, a: vista frontal, b: fotografía frontal, c: vista isométrica de arriba, y d: vista isométrica de abajo. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Testeo en cerezas

3.2.1. Caracterización del fruto:

Se utilizaron frutos maduros de cerezas dulces de dos cultivares. Las cerezas del cultivar Bing fueron cosechadas la tercera semana de diciembre en la comuna de Chillán, Región de Ñuble. Las cerezas del cultivar Regina fueron cosechadas durante la última semana de enero en la comuna de Puerto Octay, Región de los Lagos, e inmediatamente fueron trasladadas en una caja térmica (conservador

de temperatura fría) a la comuna de Chillán, Región de Ñuble. Se seleccionaron por inspección visual, 14 cerezas (cv. Bing) y 49 cerezas (cv. Regina), sin defectos para realizar los ensayos. La caracterización morfológica de tamaño se realizó midiendo el diámetro máximo de la sección ecuatorial de cada fruto con un pie de metro digital. Además, cada fruto fue pesado en una balanza electrónica (Chyo JK180, Japón).

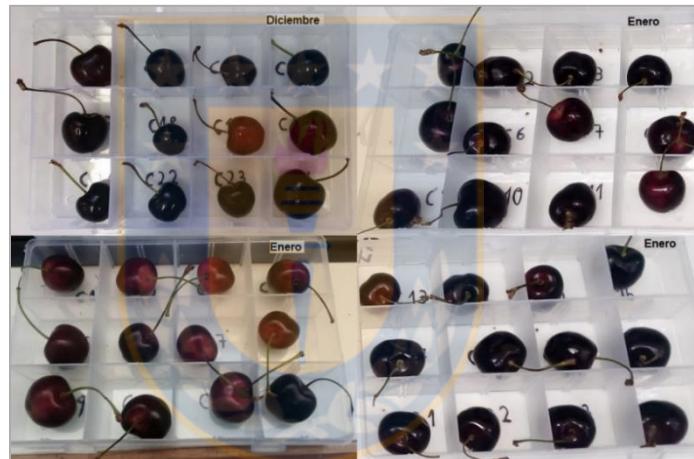


Figura 3.7. Frutos de cerezas utilizadas para las mediciones, a temperatura ambiente de 20° C. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.8. A la izquierda, la medición de la masa con la balanza de precisión, y a la derecha la medición de diámetro con el pie de metro digital. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Mediciones ultrasónicas

La medición con ondas ultrasónicas se efectuó con el montaje de elementos descrito anteriormente en 14 frutos del cv. Bing (con 14 pulsos) y 49 frutos del cv. Regina (con 16 pulsos). A temperatura ambiente de 20° C.

Procedimiento:

Se establecieron las conexiones del transductor de 40 kHz (en modo de eco) a la tarjeta TDC1000-C2000EVM, de la tarjeta a la computadora, del generador y osciloscopio, a la tarjeta.

Se ejecutó la GUI, se cambió a la posición en modo de reloj externo, asignando 1,28 MHz (con el generador previamente configurado en 1,28 MHz), se cargó la configuración de pulsos (archivo formato “.txt” previamente guardado), se posicionaron los frutos, de tal manera que un lado correspondiente al máximo diámetro ecuatorial del fruto este orientado hacia el transductor y en contacto con el mismo. Se activó el botón CONTINUOUS TRIGGER, y se procedió a realizar la lectura del voltaje en la cresta y en el valle, a partir del término del último pulso enviado, en 21 ciclos de onda sinusoidal, en la pantalla del osciloscopio, utilizando el cursor vertical. Igualmente se registró la lectura del voltaje de la onda en ausencia de muestra, para ambos números de pulsos.

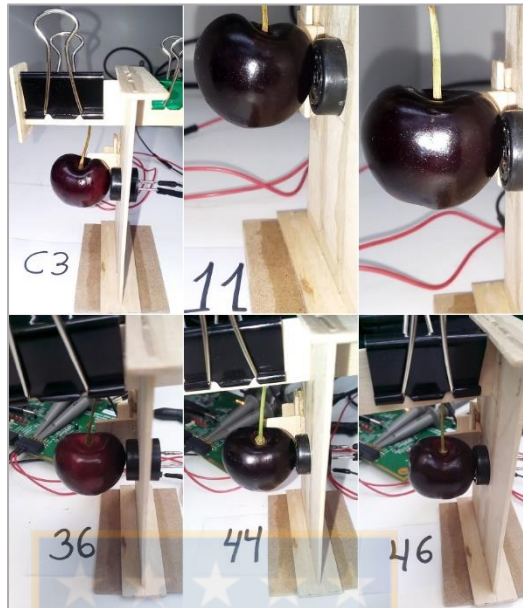


Figura 3.9. Cerezas en el soporte y en contacto con el transductor de 40 kHz, durante las mediciones ultrasónicas. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Mediciones mecánicas

La firmeza de los frutos se determinó inmediatamente después de realizadas las mediciones ultrasónicas, con el equipo Cherry-Tex CV2.0 (Universidad de Concepción, CDTA, Chile). Este equipo se caracteriza por determinar la resistencia mecánica a la deformación de frutos después de la aplicación de una presión máxima de 350 g fuerza a una velocidad constante de 2 mm s^{-1} a través de un vástago cilíndrico. Este vástago posee una zona de contacto para cada fruto individual del tipo placa plana, localizado en un plato metálico con 15 perforaciones de forma cóncava tipo elipsoide de 14 mm de ancho y 3 mm de profundidad, la cual permite que la fruta no se desplace durante la medición.

La firmeza se determinó en los 14 frutos (cv. Bing) y los 49 frutos (cv. Regina). A temperatura ambiente de 20° C. Las mediciones se realizaron en el máximo diámetro ecuatorial, de modo que el contacto de la placa plana con la mejilla de la cereza, fue en las proximidades de la zona de lectura ultrasónica. Se registraron los datos en gf mm^{-1} .



Figura 3.10. Cerezas ubicadas en el plato metálico del equipo Cherry-Tex CV2.0, durante la medición de firmeza por compresión. Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Análisis de datos

Se utilizó Microsoft Excel 2019, Minitab® (Minitab Inc., 2017), e InfoStat (Di Rienzo et al., 2018) para realizar análisis descriptivos, análisis de varianza, análisis de regresión lineal, análisis de regresión multilínea y análisis de regresión no lineal.

Por medio del análisis de la varianza (ANAVA) de la variable dependiente voltaje, se comparó las mediciones en cereza versus la medición sin muestra (o control),

utilizando la prueba de comparación múltiple de Tukey, con un nivel de significación nominal de 0,05.

Se estudió la relación funcional entre la variable respuesta y la variable predictora ("Y" y "X"). para ello los resultados de cada cultivar de cerezas, por separado, fueron sometidos a análisis de regresión lineal simple, regresión lineal múltiple y regresión cuadrática. Se analizó la relación entre la firmeza y el voltaje, entre la masa y el voltaje, entre el diámetro y el voltaje, entre la masa y la firmeza, entre el diámetro y la firmeza y entre el diámetro y la masa.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones de masa (o masa) y diámetro que caracterizan al fruto de cereza, junto a los resultados de firmeza y los valores medios de voltaje, se presentan en las Tablas 4.1 y 4.2. Se observó que el color de la piel de los frutos varió desde rojo claro, rojo, rojo parduzco y rojo oscuro. La forma de fruto más recurrente fue reniforme (ver formas de frutos en Figura 7.4 de anexos).

Tabla 4.1. Resultados de las mediciones de masa, diámetro, firmeza y voltaje, de cerezas cv. Bing. Mas las medidas de resumen y el voltaje sin muestra.

Muestra	Masa (g)	Diámetro (mm)	Firmeza (gf mm ⁻¹)	Voltaje (V)
Cereza				
B1	10,8449	28,53	189,68	3,70
B2	6,7639	23,55	198,62	3,24
B3	11,5407	29,31	177,82	3,37
B4	11,7523	29,71	182,34	3,59
B5	7,7202	25,71	180,78	2,82
B6	10,1530	27,52	177,24	2,33
B7	10,5449	28,36	176,07	3,57
B8	7,8398	24,38	178,72	2,80
B9	10,3476	27,38	173,49	3,17
B10	8,4878	26,50	177,48	2,33
B11	8,5446	25,95	186,62	3,03
B12	10,1352	27,52	172,69	3,42
B13	11,7346	29,28	174,63	3,38
B14	6,8423	23,62	177,60	3,28
n	14	14	14	14
Media	9,52	26,95	180,27	3,15
D.E.	1,78	2,07	7,10	0,44
CV	18,68	7,70	3,94	13,84
Mín	6,76	23,55	172,69	2,33
Máx	11,75	29,71	198,62	3,70
Sin muestra	-	-	-	1,18

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.2. Resultados de las mediciones de masa, diámetro, firmeza y media de voltaje, cerezas cv. Regina. Incluye las medidas de resumen y el voltaje sin muestra.

Muestra	Masa	Diámetro	Firmeza	Voltaje
Cereza	(g)	(mm)	(gf mm ⁻¹)	(V)
R1	11,1446	28,43	200,56	3,29
R2	11,2930	29,10	199,02	3,33
R3	8,4975	25,68	201,59	3,56
R4	10,4598	27,54	194,20	3,80
R5	11,8212	29,56	187,97	3,67
R6	9,1550	26,34	189,42	3,81
R7	10,5962	27,87	198,64	3,67
R8	8,4210	25,29	199,05	3,67
R9	15,3350	31,59	177,86	3,79
R10	12,8788	30,05	183,22	3,80
R11	13,4535	30,57	182,97	3,75
R12	12,0563	28,55	176,36	3,34
R13	11,1684	27,65	214,79	3,70
R14	8,7386	25,88	228,27	3,20
R15	11,4326	28,22	206,10	3,59
R16	10,0019	26,07	182,58	3,67
R17	10,2912	27,92	218,21	3,50
R18	14,0990	31,16	205,21	3,71
R19	11,6188	30,09	189,85	3,75
R20	10,2013	27,45	197,28	2,82
R21	13,3184	29,38	182,22	3,78
R22	10,8908	27,20	199,93	3,51
R23	12,1203	27,94	180,52	3,80
R24	15,5661	31,71	203,41	3,88
R25	10,7513	26,96	193,97	3,65
R26	11,5425	28,71	205,51	3,80
R27	14,3916	30,81	202,97	3,78
R28	9,7229	26,01	196,28	3,35
R29	15,0658	31,85	183,74	3,84
R30	11,3435	27,66	203,84	3,78
R31	11,4325	27,65	198,59	3,55
R32	9,1317	25,96	207,75	3,58
R33	11,9190	27,64	203,39	3,56
R34	10,8755	28,65	218,19	3,50
R35	11,3860	28,21	198,79	3,73
R36	13,4965	31,56	193,19	3,28
R37	12,0157	28,87	205,55	3,64
R38	12,4118	28,71	191,39	3,76
R39	12,3965	28,58	203,30	3,84
R40	10,9379	28,61	205,26	3,63

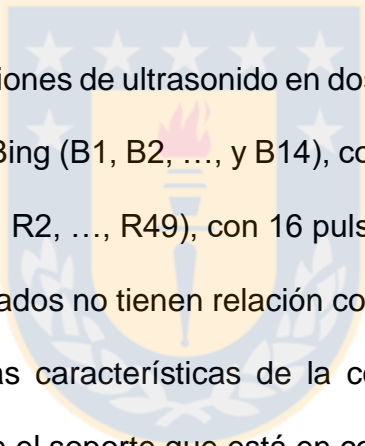
Muestra	Masa	Diámetro	Firmeza	Voltaje
Cereza	(g)	(mm)	(gf mm ⁻¹)	(V)
R41	9,7656	25,35	208,50	2,89
R42	12,4384	27,95	181,79	3,69
R43	12,9888	29,13	214,80	3,82
R44	11,8262	28,83	177,69	3,40
R45	9,5871	25,41	192,09	3,57
R46	8,5300	24,55	180,71	3,70
R47	11,5568	29,16	182,50	3,17
R48	9,5303	25,85	195,75	3,66
R49	10,7681	27,34	190,99	3,71
n	49	49	49	49
Media	11,44	28,19	196,65	3,60
D.E.	1,75	1,84	11,93	0,24
CV	15,33	6,54	6,06	6,57
Mín	8,42	24,55	176,36	2,82
Máx	15,57	31,85	228,27	3,88
Sin muestra	-	-	-	1,11

Fuente: Elaboración propia

Los promedios de masa y diámetro, de Bing concuerdan con los valores característicos de la variedad, ya que, según Candan (2006) es entre 8 y 10 gramos. En Regina, la media de diámetro afirma la descripción establecida sobre la variedad como una cereza de buen calibre (> 26 mm) (Ellena, 2012).

El cultivar Bing presentó valores de firmeza entre 172,69 gf mm⁻¹ y 198,62 gf mm⁻¹ y el cultivar Regina, mostró un mínimo de 176,36 gf mm⁻¹ hasta un máximo de 228,27 gf mm⁻¹. Es decir, ambos cultivares tienen valores de firmeza menores a 250 gf mm⁻¹, que es el umbral mínimo de referencia aceptado en los mercados según López-Ortega et al. (2016). En consecuencia, las cerezas utilizadas en este estudio se clasificaron como demasiado blandas, ya que, según el criterio de clasificación de Stanich et al. (2016), ingresan a esta categoría aquellos

valores de firmeza inferiores a $2,56 \text{ N mm}^{-1}$ ($\sim 261,047 \text{ gf mm}^{-1}$). Es posible que el tiempo transcurrido desde la cosecha hasta el momento de la realización de las mediciones de los frutos de cereza, tenga influencia directa en los bajos valores de firmeza determinados puesto que en otros estudios se han utilizado horarios específicos de cosecha e inmediato análisis, generalmente temprano en el día, para evitar diferencias de firmeza asociadas con la variación diurna (Stanich et al., 2016).



Se realizaron las mediciones de ultrasonido en dos cultivares de cerezas. Primero a 14 frutos del cultivar Bing (B1, B2, ..., y B14), con 14 pulsos, y luego a 49 frutos del cultivar Regina (R1, R2, ..., R49), con 16 pulsos. Es necesario aclarar que el número de pulsos utilizados no tienen relación con el cultivare seleccionado para cada uno. Debido a las características de la configuración, es decir, un solo transductor montado en el soporte que está en contacto con la piel del fruto y las dimensiones de los tejidos dentro del fruto son desconocidas y diferentes entre los frutos, entonces la longitud del trayecto de las ondas ultrasónicas no se conoció, por lo tanto, no se logró obtener la velocidad de onda (Ecuación 2.5) ni tampoco determinar los coeficientes de atenuación (Ecuación 4.1). De modo que la caracterización del eco, se efectuó registrando la diferencia de voltaje en voltios (V), entre la cresta y el valle de la onda ultrasónica, en dirección de la propagación de esta, en 21 ciclos consecutivos, como se muestran en la Figura 4.1.

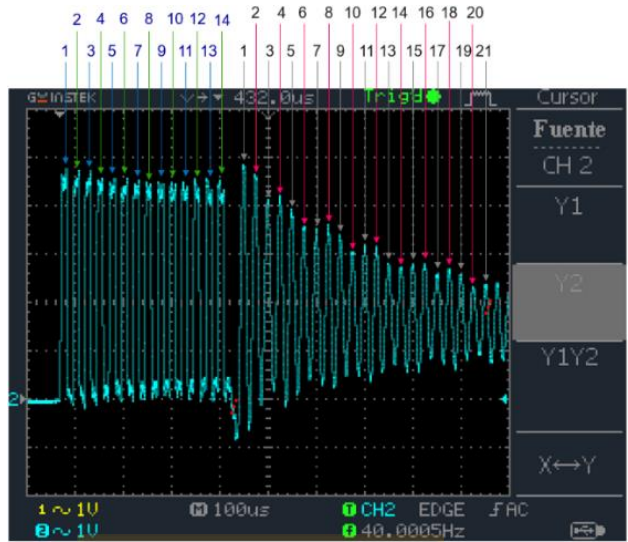


Figura 4.1. Forma de onda del eco (capturada de pantalla del osciloscopio, escala 100 μ s x 1 V), durante el análisis de la cereza con el transductor de 40 kHz con 14 pulsos. Fuente: Elaboración propia.

También se registró el voltaje del eco de la onda en ausencia de muestra. Según los valores de voltaje, existen diferencias estadísticamente significativas entre cerezas y sin muestra (sin cereza), tanto para las mediciones con 14 pulsos, como para 16 pulsos (Figuras 4.2 y 4.3).

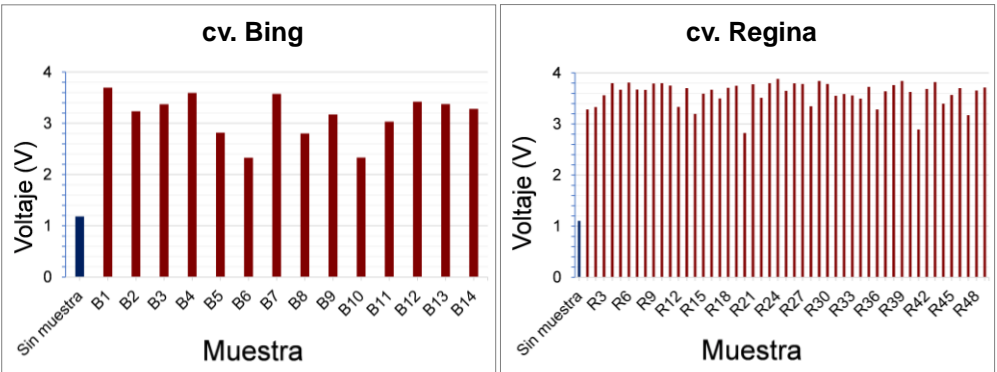


Figura 4.2. Gráficas de voltaje, con cerezas y sin muestra. Izquierda: cv. Bing, derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
voltaje (V)	15	0,59	0,56	14,44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,60	1	3,60	19,03	0,0008
Muestra	3,60	1	3,60	19,03	0,0008
Error	2,46	13	0,19		
Total	6,07	14			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,97322

Error: 0,1894 gl: 13

Muestra	Medias	n	E.E.	
sin cereza	1,18	1	0,44	A
cereza	3,15	14	0,12	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**Análisis de la varianza**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Voltaje (V)	50	0,69	0,69	6,66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6,06	1	6,06	108,55	<0,0001
Muestra	6,06	1	6,06	108,55	<0,0001
Error	2,68	48	0,06		
Total	8,74	49			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,48002

Error: 0,0559 gl: 48

Muestra	Medias	n	E.E.	
sin cereza	1,11	1	0,24	A
cereza	3,60	49	0,03	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura 4.3. Análisis de la varianza para un diseño completamente aleatorizado de voltaje, en control (sin cereza) y en cerezas. Cuadro superior: cv. Bing, número de pulsos igual a 14, cuadro inferior: cv. Regina, número de pulsos igual a 16. Fuente: Elaboración propia.

La capacidad predictiva del modelo lineal, determinada a través del coeficiente de determinación R^2 , en cerezas del cv. Bing, indica que un 2 % de la variación en la firmeza es explicada por la relación con el voltaje ($R^2 = 0,02$), asimismo la relación lineal entre la firmeza y el voltaje no fue significativa ($p = 0,910$). Similar efecto en las cerezas cv. Regina, donde tan solo un 3 % de la variación en la firmeza es explicada por la relación con el voltaje. Del mismo modo, la relación

lineal entre la firmeza y el voltaje para el cv. Regina, no fue significativa ($p = 0,238$), observar las Figuras 4.4 y 4.5 y en la Tabla 7.1 de anexos.

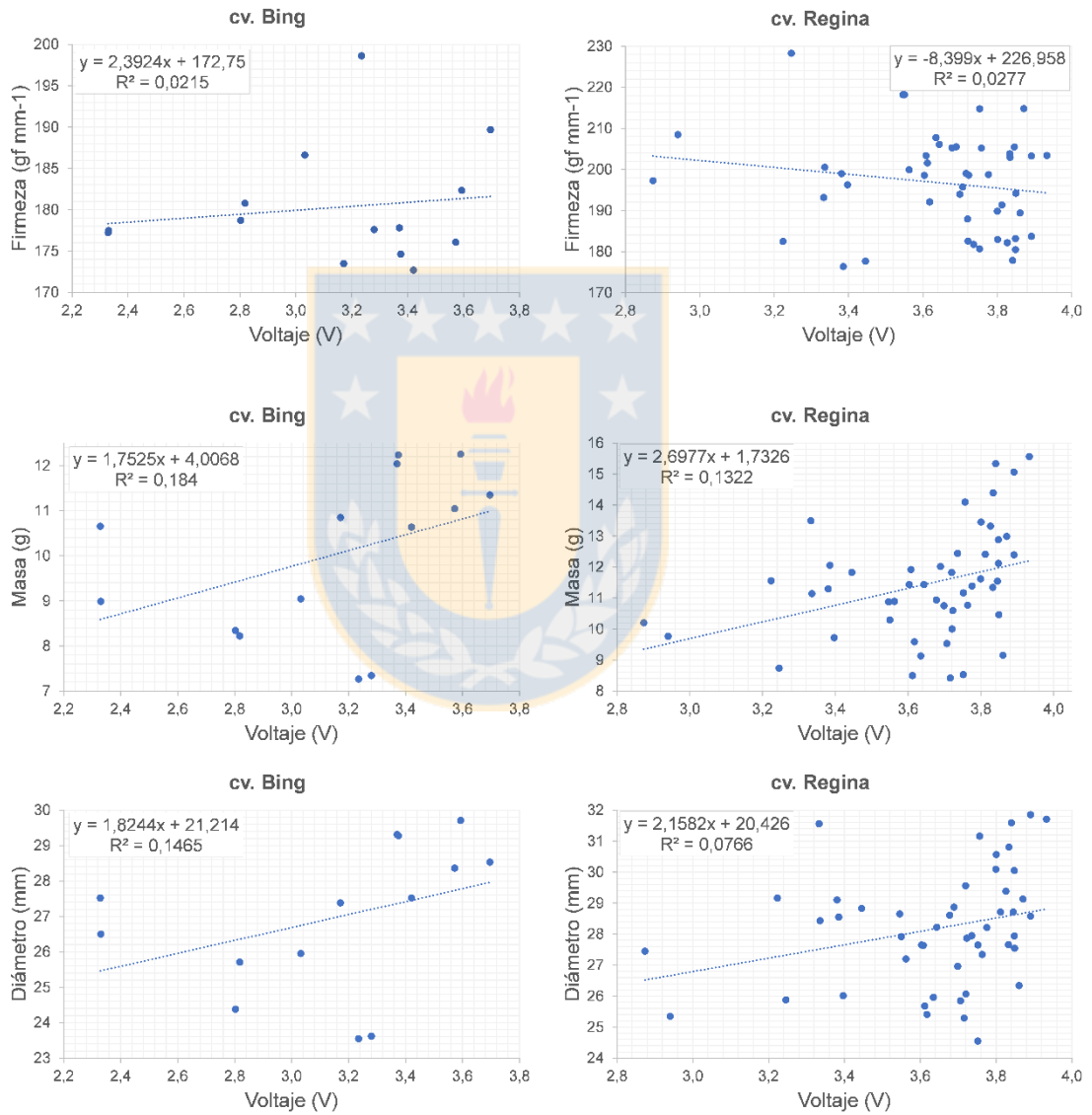


Figura 4.4. Gráficas de regresión lineal simple de la relación funcional entre la firmeza vs el voltaje, la masa vs el voltaje, y el diámetro vs el voltaje, en cerezas dulces. A la izquierda el cv. Bing y a la derecha el cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de regresión lineal			
Variable	N	R ²	R ² Aj
Firmeza (gf mm ⁻¹)	14	0,02	0,00

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	172,62	14,78	140,42	204,81	11,68	<0,0001	
Voltaje (V)	2,43	4,66	-7,71	12,58	0,52	0,6108	0,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14,59	1	14,59	0,27	0,6108
Voltaje (V)	14,59	1	14,59	0,27	0,6108
Error	640,93	12	53,41		
Total	655,51	13			

Análisis de regresión lineal			
Variable	N	R ²	R ² Aj
Firmeza (gf mm ⁻¹)	49	0,03	0,01

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	227,77	26,14	175,18	280,36	8,71	<0,0001	
Voltaje (V)	-8,65	7,25	-23,24	5,94	-1,19	0,2388	1,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	200,68	1	200,68	1,42	0,2388
Voltaje (V)	200,68	1	200,68	1,42	0,2388
Error	6626,35	47	140,99		
Total	6827,03	48			

Figura 4.5. Análisis de regresión lineal entre firmeza y voltaje. Cuadro superior: cv. Bing, cuadro inferior: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, dada la alta dispersión de los datos y la escasa relación obtenida entre firmeza y voltaje de cerezas, es que no se logró determinar la asociación entre las ondas de ultrasonido y la firmeza. Sin embargo, Mizrach y Flitsanov (1999) usaron ultrasonido (en modo de transmisión directa) para evaluar la atenuación versus la firmeza durante el almacenamiento de palta, y mediante un procedimiento de regresión no lineal, obtuvieron que la atenuación (en dB mm⁻¹) de las ondas ultrasónicas aumentó mientras que la firmeza (en N) disminuyó ($R^2 = 0,98$). Basado en sus resultados, ellos sugirieron que la firmeza del aguacate

podría predecirse a partir de mediciones de atenuación ultrasónica. Entonces, para establecer una relación entre lo señalado por los autores, y entender la relación de voltaje y firmeza en el presente estudio, nos regiremos a partir del siguiente análisis. La atenuación se calcula mediante la siguiente expresión exponencial (Krautkrämer y Krautkrämer, 1990):

$$A = A_0 e^{-\alpha l} \quad (4.1)$$

Donde l es la distancia entre las sondas de entrada y recolección, A_0 y A , respectivamente, son las amplitudes de la señal ultrasónica al principio y al final de la ruta de propagación de la onda ultrasónica, y α es el coeficiente de atenuación aparente de la señal.

A partir de esta ecuación se podría deducir que cuando se refiere a que la atenuación aumenta, es porque la amplitud al final de la ruta de propagación de la onda es menor, llevándolo a nuestro sistema de medición, significaría que a mayor atenuación es menor la amplitud al final de la ruta de propagación, o sea que el voltaje también es menor, entonces la observación que podemos hacer es que en la medida que disminuye la firmeza, disminuye el voltaje, o inversamente, a medida que aumenta la firmeza, aumenta el voltaje. O sea, este último fenómeno ocurre en las cerezas del cv. Bing (Figura 4.4, cuadro superior izquierdo). Sin embargo, no hay que olvidar que este breve análisis no pudo ser demostrado en este trabajo puesto que como se dijo anteriormente, la relación

lineal y no lineal, analizada a través los coeficientes de correlación (Pearson y Spearman) entre las variables firmeza y voltaje no fue significativa.

No sabemos por qué no encontramos relación entre la firmeza y la medición ultrasónica en las cerezas medidas, puesto que otros autores si han reportado relaciones significativas de estas variables en otros frutos, sin embargo algunas observaciones al respecto son, que para este estudio se midieron frutos de firmeza relativamente similar, una sola vez y se realizó solo una medición por fruto, utilizando el modo pulso eco, mientras que para el ejemplo anterior se realizaron múltiples mediciones locales sobre la superficie del fruto de palta, a diferentes distancias entre las sondas ultrasónicas, además analizaron los frutos en distintos tiempos de almacenamiento (durante la maduración), utilizando el modo de transmisión. Por lo que se suponemos que aumentar la cantidad de lecturas sobre la piel de la cereza ayudaría para obtener mejores resultados. Pero para ello también es obligatorio un sistema rápido de adquisición de datos.

Conforme al análisis de los resultados, de los parámetros analizados en cerezas, firmeza, masa, y diámetro, solo masa tuvo correlación lineal con los valores medios de voltaje, esta es una relación débil positiva y se puede observar en la gráfica de masa versus voltaje del cv. Regina de la Figura 4.4 (para más detalles sobre los coeficientes de correlación y determinación revisar Tabla 7.1 de anexos).

Visto que a partir del análisis de regresión entre firmeza y masa se observa que su relación lineal no es significativa, tanto en el cv. Bing ($p = 0,184$), como en el cv. Regina ($p = 0,086$), parecido es lo que ocurre entre la firmeza y el diámetro, donde su relación lineal tampoco es significativa, ni en el cv. Bing ($p = 0,209$), ni en el cv. Regina ($p = 0,215$) (gráficas de la Figura 4.6). Estos resultados no confirman, ni descartan lo expuesto por Campoy et al. (2015), ya que, ellos señalan que la firmeza y la masa del fruto parecen estar inversamente correlacionados en los diferentes cultivos.

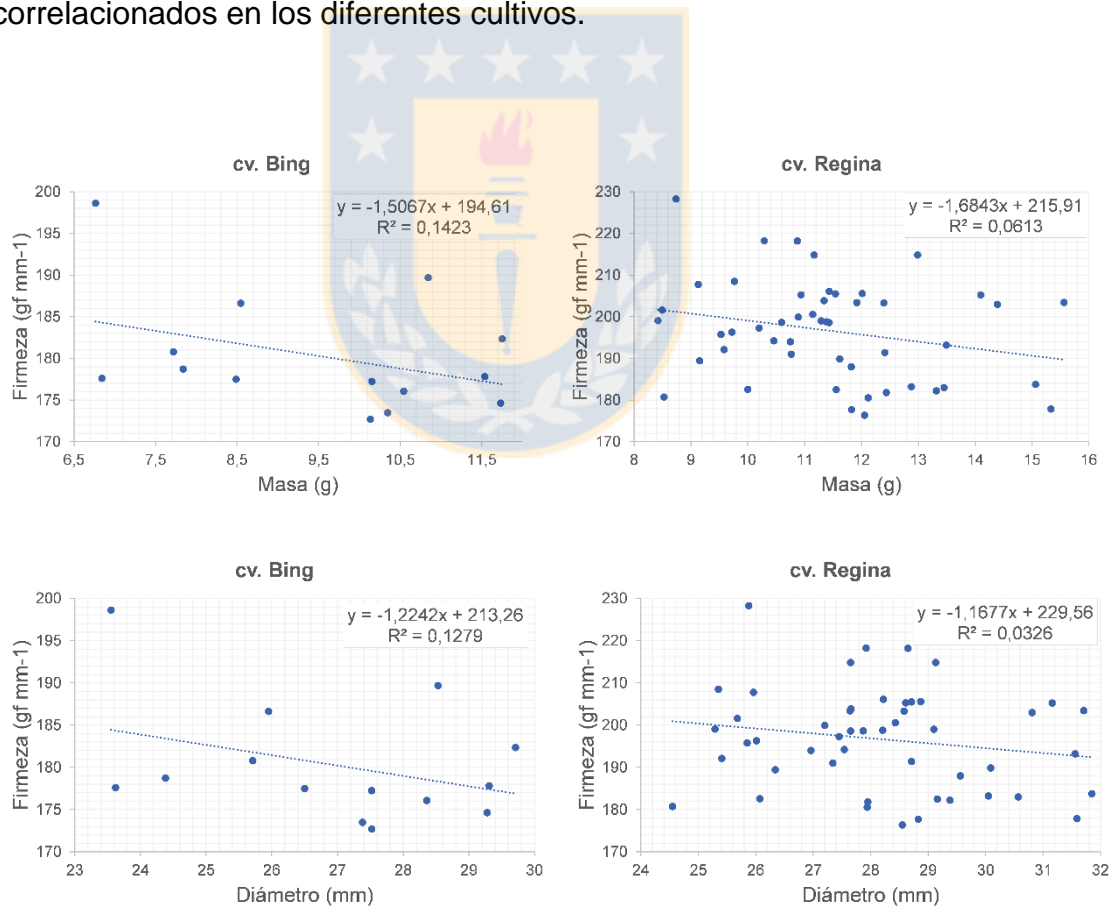


Figura 4.6. Gráfica de regresión lineal entre la firmeza versus la masa, y entre la firmeza versus el diámetro, de cerezas dulces. Izquierda: cv. Bing; y derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, tanto la masa como el diámetro por sí solos no se recomiendan para estimar la firmeza de cerezas. El análisis de asociación no necesariamente lineal realizado a través de la correlación de Spearman, también descarta la presencia de relación significativa.

A continuación, se explican las relaciones del diámetro con el voltaje, de la masa con el voltaje y las influencias en la firmeza que tienen el voltaje, el diámetro y la masa. En las cerezas del cv. Bing, la relación lineal entre diámetro y voltaje no es significativa, sin embargo, una relación no lineal entre diámetro y voltaje sí es estadísticamente significativa ($p = 0,046$), un modelo de regresión cuadrático puede explicar 42,84 % de la variación en diámetro. La correlación (de Spearman) igual a 0,592 ($p = 0,026$) que indica que cuando el voltaje aumenta, el diámetro también tiende a aumentar. En este escenario la ecuación final del modelo es:

$$y = 75,34 - 35,25x + 6,206x^2 \quad (4.2)$$

Luego, en este mismo cultivar, la relación entre masa y voltaje no es estadísticamente significativa, tanto lineal como cuadrática. Entonces en un análisis de regresión múltiple se obtiene que no existe suficiente evidencia para concluir que cualquiera de las variables, voltaje y diámetro, o voltaje y masa, tienen una relación estadísticamente significativa con firmeza. Lo mismo ocurre

si analizamos la relación entre voltaje, diámetro y masa en la predicción de firmeza.

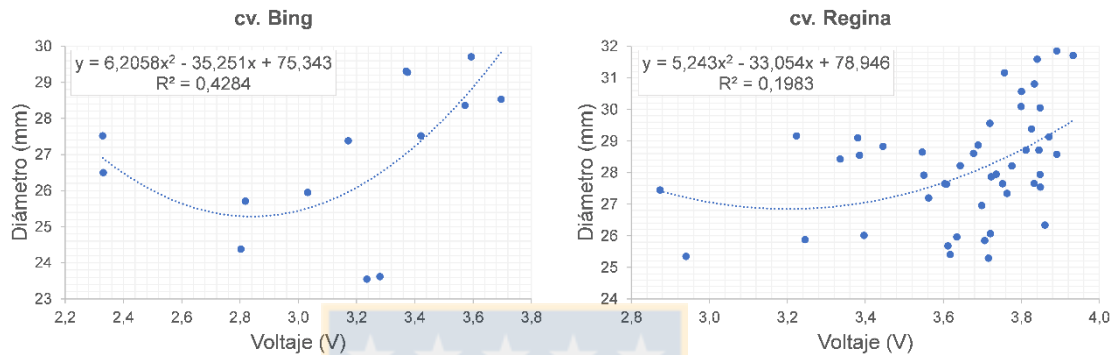


Figura 4.7. Gráfica de modelo cuadrático de la relación entre el diámetro y el voltaje, de cerezas. Izquierda: cv. Bing, y derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

En las cerezas del cv. Regina, no existe suficiente evidencia para concluir que las variables voltaje y diámetro, tienen una relación estadísticamente significativa con firmeza, sin embargo, existe relación significativa del voltaje y masa con la firmeza ($p = 0,041$), consiguiendo un modelo de regresión que puede explicar 16,57 % de la variación en firmeza, la ecuación del modelo es la siguiente:

$$y = 666 - 122,8x_1 - 41,8x_2 + 10,91x_1 * x_2 \quad (4.3)$$

Donde, y es firmeza, x_1 es voltaje, y x_2 es masa.

Luego considerando los tres parámetros, voltaje, diámetro y masa, se crea un modelo que puede explicar 26,9 % de la variación en firmeza ($p = 0,016$), siendo

voltaje y masa las variables que más aportan al modelo. La ecuación final del modelo es:

$$y = 240 - 177,5x_1 + 43,7x_2 - 65,5x_3 - 0,698x_2^2 + 16,20x_1 * x_3 \quad (4.4)$$

Donde, y es firmeza, x_1 es voltaje, x_2 es diámetro, y x_3 es masa.

En la relación entre masa y voltaje, un modelo de regresión lineal explica 13,22 % de la variación en masa, mostrando relación significativa entre las variables ($p < 0,05$), cuya correlación débil positiva ($r = 3,36$) indica que cuando voltaje aumenta, masa también tiende a aumentar.

Posteriormente, en este mismo cultivar, la correlación lineal entre diámetro y voltaje, no es estadísticamente significativa, sin embargo, la correlación de Spearman igual a 0,342 ($p = 0,016$), enseña la existencia de relación probablemente no lineal entre las variables. Por otro lado, el diagrama de dispersión y la gráfica de residuos, exhiben dos puntos de datos con residuos grandes, al quitar estos puntos de datos, correspondientes a las cerezas R36 y R46, se obtiene inmediatamente relación estadísticamente significativa entre diámetro y voltaje, un modelo lineal explicaría 14,66 % de la variación en diámetro ($p = 0,008$), la correlación débil positiva igual a 0,38 indica que cuando voltaje aumenta, diámetro también tiende a aumentar. Con la siguiente ecuación de un modelo cuadrático se puede explicar 19,83 % de la variación en diámetro ($p = 0,008$):

$$y = 78,95 - 35,05x + 5,243x^2 \quad (4.5)$$

Entonces, en base a la relación no lineal estadísticamente significativa obtenida entre el diámetro y el voltaje en cerezas de los cvs. Bing y Regina, se sugiere que la técnica de medición de voltaje se puede aplicar a las frutas para predecir diámetro.

Por último, la fuerte correlación lineal obtenida entre el diámetro y la masa del fruto de cereza, tanto en el cv. Bing ($r = 0,98$), como en el cv. Regina ($r = 0,93$), es semejante a la fuerte correlación lineal entre el volumen y la masa del fruto encontrada por López-Ortega et al (2016). Por lo tanto, en cerezas, se expone que el diámetro aumenta en la medida que la masa aumenta, o viceversa. Observar las Figuras 4.8 y 7.5 (de anexos).

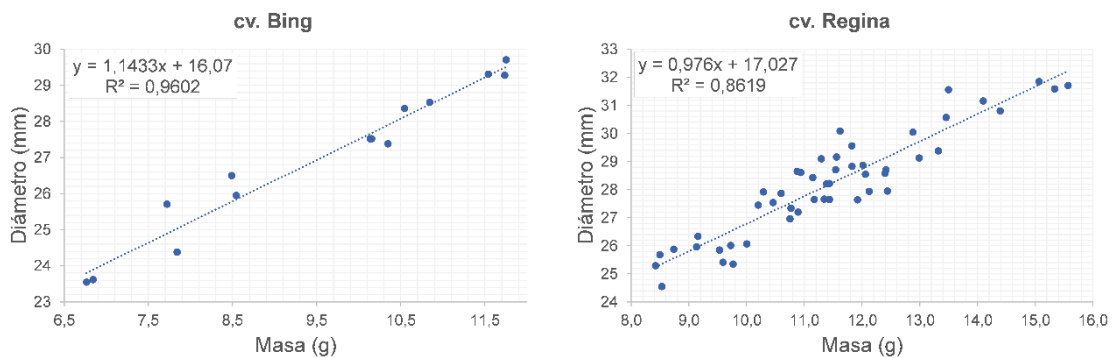


Figura 4.8. Gráfica de regresión lineal de la relación entre el diámetro y la masa, de cerezas. Izquierda: cv. Bing, y derecha: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

En diversos artículos científicos se ha mencionado que el entendimiento y el uso de la tecnología de ultrasonido es complejo, es así como Kuttruff (1991) señala que la propagación del sonido en los sólidos es de una complejidad sustancialmente mayor que la de los fluidos, debido a que un cuerpo sólido intenta mantener no solo su volumen sino también su forma, esto da como resultado una mayor variedad de posibles tipos de ondas en el cuerpo sólido. Ya que, en un sólido no solo se pueden propagar ondas longitudinales como en fluidos, sino que también ondas transversales.

Las materias son especialmente complicadas en sólidos anisotrópicos donde las constantes elásticas, así como muchas otras de sus propiedades físicas, dependen de la dirección u orientación. Asimismo, en una fruta, la estructura mecánica del tejido, sus índices de calidad fisicoquímica y cada cambio en los atributos de calidad afectan la energía de la señal recibida (Bechar et al., 2005). Por consiguiente, con estos argumentos de base, con los resultados obtenidos y considerando, además que, en la mayoría de los casos, los sistemas han sido desarrollados para cada tipo específico de fruta. Se recomienda realizar más estudios para testimoniar la relación cuantitativa entre la propiedad mecánica de los frutos de cereza y sus parámetros ultrasónicos.

Sin embargo, se considera pertinente mencionar algunas recomendaciones que podrían ser de utilidad en investigaciones futuras.

El trabajo debe continuar en dos aspectos claves, uno es la mejora en la configuración de hardware y software, con la finalidad de conseguir el almacenamiento de la señal completa, lograr su posterior procesamiento y proporcionar rapidez al muestreo. También sería importante proporcionar más opciones de rangos de frecuencia de transductores y probar mediciones con el modo de transmisión directa (un transductor que actúa como transmisor y el otro como un receptor), ya que, Mizrach (2004) reportó como exitosa esta técnica de medición ultrasónica.

El otro aspecto clave, es mejorar el diseño experimental, es decir, aumentar el tamaño de la población (número total de frutas medidas), aumentar el número de variables, para conocer la relación de diferentes cambios fisicoquímicos e índices de calidad de la cereza, con sus parámetros ultrasónicos como la atenuación, la velocidad onda o voltaje.

Y una última observación, no menos importante, es considerar que en la mayoría de casos que se ha logrado correlacionar con éxito el ultrasonido y la firmeza, se realizaron mediciones de penetración destructiva (Mizrach, 2008). Recordemos que en esta investigación las mediciones de firmeza se realizaron de manera no destructiva.

5. CONCLUSIONES

Se obtuvo el diseño y la construcción de un dispositivo de medición de cerezas basado en ultrasonido, no destructivo. Y puede utilizarse en frutos firmes y blandos.

Las mediciones ultrasónicas realizadas en frutos enteros con el dispositivo construido indican que el voltaje por sí solo, no es suficiente evidencia para medir firmeza, sin embargo, en combinación con el diámetro y la masa pueden explicar 26,9 % de la variación en firmeza medida en cerezas del cv. Regina.

La técnica de medición de voltaje puede utilizarse para predecir el diámetro de las cerezas.

El dispositivo de laboratorio construido se propone como un prototipo preliminar que da apertura a posteriores investigaciones y desarrollos sobre mediciones no destructivas de frutas basadas en la tecnología de ultrasonidos. No obstante, es indispensable avanzar a la adquisición automática de datos, para realizar múltiples lecturas rápidas de las ondas ultrasónicas completas en la piel del fruto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aburto Bastías, J. I. (2012). Aplicación de ácido giberélico para retrasar la maduración de cerezas (*Prunus avium* L.) en el sur de Chile. Tesis presentada para optar al Título profesional de Ingeniero Agrónomo y al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias con mención en Producción Frutícola, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Acero, N., Gradillas, A., Beltran, M., García, A. y Mingarro, D. M. (2019). Comparison of phenolic compounds profile and antioxidant properties of different sweet cherry (*Prunus avium* L.) varieties. *Food Chemistry*, 279, 260-271.
- Aglar, E., Ozturk, B., Guler, S. K., Karakaya, O., Uzun, S. y Saracoglu, O. (2017). Effect of modified atmosphere packaging and 'Parka' treatments on fruit quality characteristics of sweet cherry fruits (*Prunus avium* L. '0900 Ziraat') during cold storage and shelf life. *Scientia Horticulturae*, 222, 162-168.
- Aires, A., Dias, C., Carvalho, R. y Saavedra, M. J. (2017). Analysis of glycosylated flavonoids extracted from sweet-cherry stems, as antibacterial agents against pathogenic *Escherichia coli* isolates. *Acta Biochimica Polonica*, 64(2), 265-271.
- Andrews, P. K. y Li, S. 1995. Cell wall hydrolytic enzyme activity during development of nonclimacteric sweet cherry (*Prunus avium* L.) fruit. *Journal of Horticultural Science*, 70(4), 561-567.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D. y Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food research international*, 48(2), 410-427.
- Azcárate, T. G., Valenciano, J. DE P., Giacinti, M. A. (2019). Competitividad internacional de la cereza. *Revista de fruticultura*, (70), 108-125.
- Bal, E. y Torçuk, A. İ. (2020). Effect of ultrasound treatment combined with salicylic acid treatment reduces decay and improves storage life in sweet cherry fruit. *Erwerbs-Obstbau*. <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00505-x>
- Balas, F., López-Corrales, M., Serradilla, M. J., Cai, L., Lezzoni, A. y Wünsch, A. (2019). Firmness QTL mapping using an 'Ambrunés' x 'Sweetheart' sweet cherry population. *Acta Horticulturae*, 1235, 41-46.

- Barreiro, P. y Ruiz-Altisent, M. (1996). Propiedades mecánicas y calidad de frutos, definiciones y medidas instrumentales. *Fruticultura Profesional*, 77, 48-55.
- Bastías, R. M., Diez, F., y Finot, V. L. (2014). Tasa de crecimiento absoluto y relativo como indicadores de fases de desarrollo del fruto en cerezo *Prunus avium*. *Chilean J. Agric. Anima. Sci*, 30(2), 89-98.
- Bechar, A., Mizrach, A., Barreiro, P. y Landahl, S. (2005). Determination of mealiness in apples using ultrasonic measurements. *Biosystems Engineering*, 91(3), 329-334.
- Belge, B., Goulao, L. F., Comabella, E., Graell, J. y Lara, I. (2017). Refrigerated storage and calcium dips of ripe 'Celeste' sweet cherry fruit: Combined effects on cell wall metabolism. *Scientia Horticulturae*, 219, 182-190.
- Bernalte, M. J., Sabio, E., Hernández, M. T. y Gervasini, C. (2003). Influence of storage delay on quality of 'Van' sweet cherry. *Postharvest Biology and Technology*, 28(2), 303-312.
- Bravo, J. (2012). El mercado de la cereza [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile. Recuperado en <https://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/5745.pdf> [2020, 23 de marzo].
- Bravo, J. (2014). Cerezas: actualización de un mercado [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile. Recuperado en <https://odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/2659/mercadoCerezas201404.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [2020, 23 de marzo].
- Butz, P., Hofmann, C. y Tauscher, B. (2005). Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *Journal of Food Science*, 70(9), R131-R141.
- Calderón, J., Marroquin, A., Luviano, L., Maqueda, V., Marín, E. y Calderón, A. (2019). Sonido, Ultrasonido y Cavitación. *Latin American Journal of Physics Education*, 13(4), 4311-1-4311-5.
- Campoy, J. A., Le Dantec, L., Barreneche, T., Dirlwanger, E. y Quero-García, J. (2015). New insights into fruit firmness and weight control in sweet cherry. *Plant Molecular Biology Reporter*, 33(4), 783-796.
- Candan, A. P. (2006). Cosecha y poscosecha de cerezas. *Fruticultura y Diversificación*, 12(50), 32-38.

- Candan, A. P., Raffo, D., Gomila, T. y Colodner, A. (2017). Pautas para el mantenimiento de la calidad de cerezas frescas. (1a. ed.). Ediciones INTA. Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle, Río Negro, Argentina.
- Chen, L. y Opara, U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food Research International*, 51(2), 823-835.
- Chen, F., Zhang, M. y Yang, C. H. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics - Sonochemistry*, 63, 104953.
- Coombe, B. G. (1976). The development of fleshy fruits. *Annual Review of Plant Physiology*, 27(1), 207-228.
- Crisosto, C. H., Crisosto, G. M. y Metheney, P. (2003). Consumer acceptance of 'Brooks' and 'Bing' cherries is mainly dependent on fruit SSC and visual skin color. *Postharvest Biology and Technology*, 28(1), 159-167.
- Defilippi, B. y Manríquez, D. (2011). Evaluación de sistemas de medición de firmeza para uva de mesa y cerezas utilizado en la industria frutícola. *Rev Frutíc*, 2, 26-32.
- Di Rienzo J. A., Casanoves, F., Balzarini M. G., Gonzalez L. A., Tablada E. M. y Robledo C. W. (2018). *InfoStat (v2018)* [Software de computación]. Argentina: Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Dong, F. y Wang, X. (2018). Guar gum and ginseng extract coatings maintain the quality of sweet cherry. *LWT*, 89, 117-122.
- Donoso, J., Bastías, R., Lemus, G. y Silva, L. (2007). Comportamiento fenológico del cerezo (*Prunus avium* L.) en tres localidades de la VI región, temporadas 2005-2006 y 2006-2007. Informativo Rayentue N° 8. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Rayentue, Rengo, Chile.
- Dziedzic, E., Błaszczuk, J. y Kaczmarczyk, E. (2016). Influence of rootstocks and storage conditions on the quality of sweet cherry fruits 'Regina'. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 15 (5), 119-131.
- Dziedzic, E., Błaszczuk, J. y Kaczmarczyk, E. (2017). Postharvest properties of sweet cherry fruit depending on rootstock and storage conditions. *Folia Horticulturae*, 29(2), 113-121.

- Ellena, M. (Ed.). (2012). Formación y sistemas de conducción del cerezo dulce. Boletín INIA N° 247. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Carillanca. Vilcún, Chile.
- Esti, M., Cinquanta, L., Sinesio, F., Moneta, E. y Di Matteo, M. (2002). Physicochemical and sensory fruit characteristics of two sweet cherry cultivars after cool storage. *Food Chemistry*, 76(4), 399-405.
- Fadón, E., Sallán, C.; Andreu, J. y Rodrigo, J. (2017). Variedades autocompatibles de cerezo. *Revista de Fruticultura*, 53, 24-31.
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G. V. y Weiss, J. (Eds.). (2011). *Ultrasound technologies for food and bioprocessing*. (1a. ed.) (Food Engineering Series). New York: Springer.
- Ferretti, G., Bacchetti, T., Belleggia, A. y Neri, D. (2010). Cherry antioxidants: from farm to table. *Molecules*, 15(10), 6993-7005.
- Figuroa, J. P. (Ed.). (2019). Especial Nada detiene al cerezo. [N° 105, agosto 2019]. *Revista Redagícola*, Chile.
- Flitsanov, U., Mizrach, A., Liberzon, A., Akerman, M. y Zauberman, G. (2000). Measurement of avocado softening at various temperatures using ultrasound. *Postharvest Biology and Technology*, 20(3), 279-286.
- FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO FRUTÍCOLA (2010a). Daños en cerezas [en línea]. Programa de difusión tecnológica en cerezos. FDF, Chile. Recuperado en http://www.fdf.cl/biblioteca/publicaciones/2010/archivos/Poster_Danos_Cerezas.pdf [2020, 5 de marzo].
- FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO FRUTÍCOLA (2010b). Guía de prácticas y manejos en cosecha de cerezos [en línea]. Programa de difusión tecnológica en cerezos. FDF, Chile. Recuperado en http://www.fdf.cl/biblioteca/publicaciones/2010/archivos/Guia_Cosecha_Cerezas.pdf [2020, 30 de julio].
- Gámez, M. E. (2003). Mercado de las cerezas [En línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile. Recuperado en <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/mercado-de-las-cerezas-2003> [2020, 19 de marzo].
- Garrido Álvarez, M. (2012). Valorización del efecto antioxidante, potenciador del descanso nocturno y favorecedor del estado anímico de un producto

elaborado a base de cerezas del Valle del Jerte. Tesis Doctoral, Departamento de Fisiología, Universidad de Extremadura, España.

- Giménez, M. J., Valverde, J. M., Valero, D., Zapata, P. J., Castillo, S. y Serrano, M. (2016). Postharvest methyl salicylate treatments delay ripening and maintain quality attributes and antioxidant compounds of 'Early Lory'sweet cherry. *Postharvest Biology and Technology*, 117, 102-109.
- Giménez, M. J., Serrano, M., Valverde, J. M., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Valero, D. y Guillén, F. (2017). Preharvest salicylic acid and acetylsalicylic acid treatments preserve quality and enhance antioxidant systems during postharvest storage of sweet cherry cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(4), 1220-1228.
- González-González, L., Luna-Rodríguez, L., Carrillo-López, L. M., Alarcón-Rojo, A. D., García-Galicia, I. y Reyes-Villagrana, R. (2017). Ultrasound as an alternative to conventional marination: acceptability and mass transfer. *Journal of Food Quality*, 2017, 1-8.
- Habib, M., Bhat, M., Dar, B. N. y Wani, A. A. (2017). Sweet cherries from farm to table: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(8), 1638-1649.
- Hirzel, J., Rojas, J., Sepúlveda, D., Rojas, S. y Radrigán, R. (2018). ¿Existe relación entre firmeza y contenido de materia seca en frutos de arándano? *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias - UNR*, 32(18), 20-25.
- iQonsulting (2020). Mercado internacional de cerezas. Anuario 2019/2020 (abril 2020). Santiago, Chile: iQonsulting. Recuperado en <http://www.iqonsulting.com/yb/index.php?p=inicio&lang=es> [2020, 03 de junio].
- Kappel, F., Fisher-Fleming, B. y Hogue, E. (1996). Fruit characteristics and sensory attributes of an ideal sweet cherry. *HortScience*, 31(3), 443-446.
- Kim, K. B., Jung, H. M., Kim, M. S. y Kim, G. S. (2004). Evaluation of fruit firmness by ultrasonic measurement. *Key Engineering Materials*, 270-273, 1049-1054.
- Kim, K. B., Lee, S., Kim, M. S. y Cho, B. K. (2009). Determination of apple firmness by nondestructive ultrasonic measurement. *Postharvest Biology and Technology*, 52(1), 44-48.

- Krautkrämer, J. y Krautkrämer, H. (1990). Ultrasonic testing of materials (4a. ed.). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kuttruff, H. (1991). Ultrasonics. Fundamentals and applications. London y New York: Elsevier Applied Science.
- Larrañaga, P. y Osoreo, M. A. (2018). Catastro frutícola. Principales resultados. Región de O'Higgins/Julio 2018. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA, y Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN, Santiago, Chile.
- Larrañaga, P. y Osoreo, M. A. (2019a). Catastro frutícola. Principales resultados. Región de la Araucanía/Julio 2019. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA, y Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN, Santiago, Chile.
- Larrañaga, P. y Osoreo, M. A. (2019b). Catastro frutícola. Principales resultados. Región del Maule/Julio 2019. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA, y Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN, Santiago, Chile.
- Larrañaga, E. y Osoreo, M. A. (2019c). Catastro frutícola. Principales resultados. Región de Ñuble/Julio 2019. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA, y Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN, Santiago, Chile.
- Leiva, C., Schmidt, C., Gajardo, G. y Rodríguez, A. (2017). Manual técnico productivo y económico bajo condición actual y clima proyectado al 2030. (Publicación CIREN N° 216). Centro de Información de Recursos Naturales, Chile.
- Loewe, V., Pineda, G. y Delard, C. (1997). Monografía de cerezo común (*Prunus avium*). Santiago: INFOR.
- Long, L. E., Whiting, M. y Nuñez-Elisea, R. (2007). Sweet cherry cultivars for the fresh market [en línea], PNW 604. Servicio de Extensión de la Universidad Estatal de Oregón. Recuperado de https://ir.library.oregonstate.edu/concern/parent/1r66j140x/file_sets/x059c769z [2020, 14 de abril].
- López Camelo, A. F. (2003). Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas. Del campo al mercado. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 151. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la

Alimentación. Recuperado en <http://www.fao.org/3/a-y4893s.pdf> [2020, 3 de abril].

López-Ortega, G., García-Montiel, F., Bayo-Canha, A., Frutos-Ruiz, C. y Frutos-Tomás, D. (2016). Rootstock effects on the growth, yield and fruit quality of sweet cherry cv. 'Newstar' in the growing conditions of the Region of Murcia. *Scientia horticulturae*, 198, 326-335.

Martín, A. (2018). Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía. Trabajo de grado, Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés.

Martínez-Romero, D., Albuquerque, N., Valverde, J. M., Guillén, F., Castillo, S., Valero, D. y Serrano, M. (2006). Postharvest sweet cherry quality and safety maintenance by Aloe vera treatment: a new edible coating. *Postharvest Biology and Technology*, 39(1), 93-100.

Matte, M. V. (1987). Efecto de la aplicación de citoquinina y giberelina (Promalín) y algunas medidas de manejo sobre la brotación lateral de cerezo (*Prunus avium* L.) var. Bing. Tesis, Ingeniero Agrónomo Especialidad Fruticultura, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Minitab, Inc. (2017). Minitab® (v18.1) [Software de computación]. Estados Unidos: Minitab, Inc.

Mitcham, E. J., Clayton, M. y Biasi, W.V. (1998). Comparison of devices for measuring cherry fruit firmness. *HortScience*, 33(4), 723-727.

Mizrach, A., Galili, N. y Rosenhouse, G. (1989). Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 2053-2058.

Mizrach, A. y Flitsanov, U. (1999). Nondestructive ultrasonic determination of avocado softening process. *Journal of Food Engineering*, 40(3), 139-144.

Mizrach, A., Flitsanov, U., Schmilovitch, Z. E. y Fuchs, Y. (1999). Determination of mango physiological indices by mechanical wave analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 16(2), 179-186.

Mizrach, A., Flitsanov, U., Akerman, M. y Zauberman, G. (2000). Monitoring avocado softening in low-temperature storage using ultrasonic measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(2), 199-207.

- Mizrach, A. (2000). Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. *Ultrasonics*, 38(1-8), 717-722.
- Mizrach, A. (2004). Assessing plum fruit quality attributes with an ultrasonic method. *Food Research International*, 37(6), 627-631.
- Mizrach, A. (2007). Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biology and Technology*, 46(3), 271-274.
- Mizrach, A. (2008). Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre-and postharvest processes. *Postharvest Biology and Technology*, 48(3), 315-330.
- Mozetič, B.; Simčič, M. y Trebše, P. (2006). Anthocyanins and hydroxycinnamic acids of Lambert Compact cherries (*Prunus avium* L.) after cold storage and 1-methylcyclopropene treatment. *Food Chemistry*, 97(2), 302-309.
- Muñoz, M. (2015). Cerezas: frutas en expansión (agosto). Chile: Oficina de Estudios y Políticas. Recuperado en <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2015/08/Cerezas2015.pdf> [2020, 3 mayo].
- Muskovics, G., Felföldi, J., Kovács, E., Perlaki, R. y Kállay, T. (2006). Changes in physical properties during fruit ripening of Hungarian sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, 40(1), 56-63.
- Muzaffar, S., Ahmad, M., Wani, S. M., Gani, A., Baba, W. N., Shah, U., Khan, A. A., Masoodi, F. A., Gani, A. G. y Wani, T. A. (2016). Ultrasound treatment: effect on physicochemical, microbial and antioxidant properties of cherry (*Prunus avium*). *Journal of Food Science and Technology*, 53(6), 2752-2759.
- Oancea, S., Grosu, C., Ketney, O. y Stoia, M. (2013). Conventional and ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from blackberry and sweet cherry cultivars. *Acta Chimica Slovenica*, 60(2), 383-389.
- Olmstead, J., Lezzoni, A. y Whiting, M. (2007). Genotypic differences in sweet cherry fruit size are primarily a function of cell number. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(5), 697-703.
- Ozkan, Y., Ucar, M., Yildiz, K. y Ozturk, B. (2016). Pre-harvest gibberellic acid (GA3) treatments play an important role on bioactive compounds and fruit quality of sweet cherry cultivars. *Scientia Horticulturae*, 211, 358-362.

- Pedros-Garrido, S., Condón-Abanto, S., Beltrán, J. A., Lyng, J. G., Brunton, N. P., Bolton, D. y Whyte, P. (2017). Assessment of high intensity ultrasound for surface decontamination of salmon (*S. salar*), mackerel (*S. scombrus*), cod (*G. morhua*) and hake (*M. merluccius*) fillets, and its impact on fish quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 64-70.
- Piccolella, S., Crescente, G., Nocera, P., Pacifico, F., Manti, L. y Pacifico, S. (2018). Ultrasound-assisted aqueous extraction, LC-MS/MS analysis and radiomodulating capability of autochthonous Italian sweet cherry fruits. *Food & Function*, 9(3), 1840-1849.
- PORTAL OFICIAL DE LA FRUTA CHILENA DE EXPORTACIÓN (2019, 23 de julio). USDA: Preven aumento en la producción e importación de cerezas en China para la temporada 2019-2020. Recuperado de <https://www.simfruit.cl/usda-preven-aumento-en-la-produccion-e-importacion-de-cerezas-en-china-para-la-temporada-2019-2020/> [2020, 18 de marzo].
- Raffo, D., Candan, A. P., Calvo, P. y Mañueco, L. (2013). Variedades de cerezas en el Alto Valle. (2a. ed.). Alto Valle: Ediciones INTA.
- Rodrigo, J. (2018). El cerezo, situación actual, innovación varietal y necesidades de polinización. *Vida Rural*, (448), 34-38.
- Rojas, S. y Radrigán R. (2014). Diseño de un equipo de medición de firmeza semiautónomo para la segregación de cereza de exportación. Trabajo presentado en Congreso Chileno del Cerezo. 22 y 23 mayo, Chillán, Chile.
- Romano, G. S., Cittadini, E. D., Pugh, B. y Schouten, R. (2006). Sweet cherry quality in the horticultural production chain. *Stewart Postharvest Review*, 6(2), 1-9.
- Ruiz-Salcedo, J. G. (2018). Diseño de un modelo de simulación para un generador de ultrasonidos. Trabajo de grado, Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Jaén, Jaén.
- Sarkar, N. y Wolfe, R. R. (1983). Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Transactions of the ASAE*, 26(2), 624-629.
- São José, J. F. B. y Vanetti, M. C. D. (2012). Effect of ultrasound and commercial sanitizers in removing natural contaminants and *Salmonella enterica* Typhimurium on cherry tomatoes. *Food Control*, 24(1-2), 95-99.

- Saracoglu, O., Ozturk, B., Yildiz, K. y Kucuker, E. (2017). Pre-harvest methyl jasmonate treatments delayed ripening and improved quality of sweet cherry fruits. *Scientia Horticulturae*, 226, 19-23.
- Schmilovitch, Z. y Mizrach, A. (2013). 16 - Instrumental assessment of the sensory quality of fruits and vegetables. *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality: A practical guide*. Oxford, UK: Woodhead Publishing Limited, pp. 446-466e.
- Serradilla, M. J., Lozano, M., Bernalte, M. J., Ayuso, M. C., López-Corrales, M. y González-Gómez, D. (2011). Physicochemical and bioactive properties evolution during ripening of 'Ambrunés' sweet cherry cultivar. *LWT-Food Science and Technology*, 44(1), 199-205.
- Shung, K. K., Cannata, J. M. y Zhou, Q. F. (2007). Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: A review. *Journal of Electroceramics*, 19(1), 141-147.
- Soto, P. A. (2017). Cerezas, análisis de un mercado en expansión y recomendaciones de negocio para un caso aplicado. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Departamento de industrias, Universidad técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.
- Stanich, K., Cliff, M. y Hampson, C. (2016). Characterizing the frequency distributions for fruit firmness of sweet cherry cultivars. *HortScience*, 51(6), 775-783.
- Terefe, N. S., Gamage, M., Vilku, K., Simons, L., Mawson, R. y Versteeg, C. (2009). The kinetics of inactivation of pectin methylesterase and polygalacturonase in tomato juice by thermosonication. *Food Chemistry*, 117(1), 20-27.
- UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS OBTENCIONES VEGETALES (2006). Directrices para ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad. Cerezo dulce (*Prunus avium* L.). TG/35/7. UPOV, Ginebra, Suiza. 32 pp.
- Usenik, V., Fabčič, J. y Štampar, F. (2008). Sugars, organic acids, phenolic composition and antioxidant activity of sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Food Chemistry*, 107(1), 185-192.
- Verlinden, B. E., De Smedt, V. y Nicolai, B. M. (2004). Evaluation of ultrasonic wave propagation to measure chilling injury in tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 32(1), 109-113.

- Whiting, M. D. y Lang, G. A. (2004). 'Bing' sweet cherry on the dwarfing rootstock 'Gisela 5': Thinning affects fruit quality and vegetative growth but not net CO₂ exchange. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(3), 407-415.
- Zhang, Z., Zhang, X., Chen, W. y Zhou, P. (2018). Conformation stability, in vitro digestibility and allergenicity of tropomyosin from shrimp (*Exopalaemon modestus*) as affected by high intensity ultrasound. *Food chemistry*, 245, 997-1009.
- Zhou, J., He, L., Karkee, M. y Zhang, Q. (2016). Effect of catching surface and tilt angle on bruise damage of sweet cherry due to mechanical impact. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 282-289.
- Zou, Y., Zhang, W., Kang, D. y Zhou, G. (2018). Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 828-836.



7. ANEXOS

7.1. Ilustraciones.

Configuración	Nombre parámetro	Descripción	Opciones	Ensayo Dic
CONFIG_0	TX_FREQ_DIV	Divisor de frecuencia para reloj TX y T1	Divide por 2 Divide por 4 Dividir por 8 (predeterminado) Divide por 16 Divide por 32 Divide por 64 Divide por 128 Divide por 256	Divide por 32
	NUM_TX	Número de pulsos de TX en una ráfaga	De 0 a 31 5 pulsos (por defecto)	16
CONFIG_1	NUM_AVG	Número de ciclos de medición a promedio en cronómetro/MCU	1 ciclo de medición (por defecto) 2 ciclos de medición. 4 ciclos de medición. 8 ciclos de medición. 16 ciclos de medición. 32 ciclos de medición. 64 ciclos de medición. 128 ciclos de medición.	1 ciclo
	NUM_RX	Número de eventos recibidos esperados	no cuenta los eventos (salida de 32 pulsos de STOP) (predeterminado) 1 evento (salida de 1 pulso STOP) 2 eventos (salida de 2 pulsos STOP) 3 eventos (salida de 3 pulsos de STOP) 4 eventos (salida de 4 pulsos STOP) 5 eventos (salida de 5 pulsos STOP)	1 STOP
CONFIG_2	VCOM_SEL	Control de referencia de voltaje de modo común	Interno (por defecto) Externo	Interno
	MEAS_MODE	Tipo de medida AFE	medición del tiempo de vuelo (por defecto) medición de temperatura	Por defecto
	DAMPING	rompe la amortiguación TX	Deshabilitar la amortiguación (por defecto) Habilitar amortiguación	Por defecto
	CH_SWP	Cambio de canal automático en modo 2 de funcionamiento. La configuración se ignora si EXT_CHSEL = 1.	0h: Deshabilitar el intercambio automático de canales (predeterminado) 1h: Habilitar cambio de canal automático	0h
	EXT_CHSEL	Selección de canal externo por pin CHSEL. EXT_CHSEL = 1 anula las configuraciones CH_SWP y CH_SEL.	0h: Desactiva la selección de canal externo (predeterminado). 1h: Habilitar selección de canal externo	0h
	CH_SEL	Pareja activa de canales TX / RX. Vea el modo de medición de tiempo de vuelo para las definiciones de canal. La configuración se ignora si EXT_CHSEL = 1.	0h: Canal 1 (por defecto) 1h: Canal 2	CH1(TX1)
	TOF_MEAS_MODE	Modo de medición de tiempo de vuelo	Modo 0 (por defecto) Modo 1 Modo 2	Modo 0

Figura 7.1. Registro de configuración de la GUI TDC1000-C2000EVM, parte 1.
Fuente: Elaboración propia.

CONFIG_3	TEMP_MODE	Canales de medición de temperatura	Medida REF, RTD1 y RTD2 (predeterminado) Medida REF y RTD1	Predeterminado
	TEMP_RTD_SEL	Tipo de RTD	PT1000 (por defecto) PT500	Por defecto
	TEMP_CLK_DIV	Divisor de reloj para el modo de temperatura	Dividir entre 8 (predeterminado) Usar TX_FREQ_DIV	Predeterminado
	BLANKING	Reducción de potencia en mediciones estándar de TOF. La longitud de la supresión se controla con el campo TIMING_REG (consulte Medición de TOF estándar con supresión de potencia).	Deshabilitar el blanqueo de energía (predeterminado) Habilitar supresión de potencia	Habilitar
	ECHO_QUAL_THLD	Calificación de eco Nivel de umbral DAC con respecto a VCOM	-35 mV -50 mV -75 mV -125 mV (por defecto) -220 mV -410 mV -775 mV -1500 mV	-220 mV
CONFIG_4	RECEIVE_MODE	Recibe el modo eco	Eco único (por defecto) Multi eco	Eco único
	TRIG_EDGE_POLARITY	Polaridad del borde de disparo	Borde ascendente (por defecto) Borde descendente	Ascendente
	TX_PH_SHIFT_POS	Posición de cambio de pulso TX 180°. No se recomienda establecer TX_PH_SHIFT_POS en 0 o 1.	Va de 0 a 31. Posición 31 (por defecto)	31
TOF_1	PGA_GAIN	Ganancia PGA	0h: 0 dB (por defecto) 3 dB 6 dB 9 dB 12 dB 15 dB 18 dB 21 dB	0 dB
	PGA_CTRL	Control de PGA	Activo (predeterminado) Anulado y apagado	Activo
	LNA_CTRL	Control de LNA	Activo (predeterminado) Anulado y apagado	Activo
	LNA_FB	Modo de retroalimentación LNA	Retroalimentación capacitiva (por defecto) Retroalimentación resistiva.	capacitiva
	TIMING_REG [9:8]	Los 2 bits más significativos del campo TIMING_REG (consulte Medición de TOF estándar y Medición de TOF estándar con supresión de energía)	0 (por defecto)	0
TOF_0	TIMING_REG [7:0]	Los 8 bits menos significativos del campo TIMING_REG (consulte Medición de TOF estándar y Medición de TOF estándar con supresión de potencia)	0 (por defecto)	0

Figura 7.2. Registro de configuración de la GUI TDC1000-C2000EVM, parte 2.
Fuente: Elaboración propia.

TIMEOUT	FORCE_SHORT_TO F	Control de tiempo de vuelo corto	Deshabilitado (por defecto) Fuerza de una breve medida de tiempo de vuelo	Por defecto
	SHORT_TOF_BLAN K_PERIOD	Período corto de tiempo de vuelo (ver Medición corta de TOF)	8 × T0 16 × T0 32 × T0 64 × T0 (predeterminado) 128 × T0 256 × T0 512 × T0 1024 × T0	Predeterminado
	ECHO_TIMEOUT	Control de tiempo de espera de recepción de eco (ver Intervalo de medición de TOF)	Habilitar el tiempo de espera de eco (predeterminado) Deshabilitar el tiempo de espera	Habilitar
	TOF_TIMEOUT_C T RL	Tiempo de espera de la ventana de escucha de eco (ver Intervalo de medición TOF)	128 × T0 256 × T0 (predeterminado) 512 × T0 1024 × T0	Predeterminado
CLOCK_RATE	CLOCKIN_DIV	Divisor CLKIN para generar T0	0h: Dividir por 1 (por defecto) 1h: Divide por 2	Dividir por 1
	AUTOZERO_PERIO D	Período de cero automático del receptor	0h: 64 × T0 (predeterminado) 1h: 128 × T0 2h: 256 × T0 3h: 512 × T0	Predeterminado
SETUP	TRIGGER UPDATE FREQ		(ms)	100
	TDC_CLK_SOURCE_SELECT		ON BOARD OSC (8MHz) EXT CLK	EXT CLK
	TDC_CLK_FREQ		(1-16 MHz)	1,28

Figura 7.3. Registro de configuración de la GUI TDC1000-C2000EVM, parte 3. Fuente: Elaboración propia.

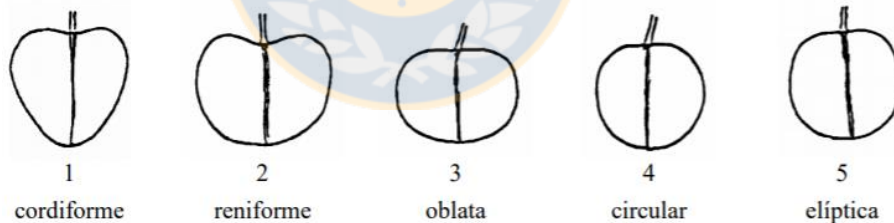


Figura 7.4. Formas de fruto de cereza (*P. avium* L.). Fuente: UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS OBTENCIONES VEGETALES (2006).

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj
Diámetro (mm)	14	0,96	0,96

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	16,07	0,65	14,65	17,49	24,73	<0,0001	
Masa (g)	1,14	0,07	1,00	1,29	17,02	<0,0001	289,58

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	53,70	1	53,70	289,58	<0,0001
Masa (g)	53,70	1	53,70	289,58	<0,0001
Error	2,23	12	0,19		
Total	55,93	13			

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj
Diámetro (mm)	49	0,86	0,86

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	17,03	0,66	15,70	18,35	25,83	<0,0001	
Masa (g)	0,98	0,06	0,86	1,09	17,12	<0,0001	293,23

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	140,54	1	140,54	293,23	<0,0001
Masa (g)	140,54	1	140,54	293,23	<0,0001
Error	22,53	47	0,48		
Total	163,06	48			

Figura 7.5. Análisis de regresión lineal entre diámetro y masa. Cuadro superior: cv. Bing, cuadro inferior: cv. Regina. Fuente: Elaboración propia.

7.2. Tabla de coeficientes.

Tabla 7.1. Resumen de coeficientes de correlación R y coeficientes de determinación R2, entre valores de variables medidas en cerezas, para el cv. Bing y para el cv. Regina.

Coeficiente Variable	cv. Bing*						cv. Regina**					
	Correlación de Pearson			Correlación de Spearman			Correlación de Pearson			Correlación de Spearman		
	Voltaje	Firmeza	Masa	Voltaje	Firmeza	Masa	Voltaje	Firmeza	Masa	Voltaje	Firmeza	Masa
Firmeza	0,147	-	-	0,037	-	-	-0,171	-	-	-0,165	-	-
Valor p	0,617	-	-	0,899	-	-	0,241	-	-	0,257	-	-
Masa	0,429	-0,377	-	0,582	-0,240	-	0,364	-0,248	-	0,435	-0,229	-
Valor p	0,126	0,184	-	0,029	0,409	-	0,010	0,086	-	0,002	0,114	-
Diámetro	0,383	-0,358	0,980	0,592	-0,240	0,972	0,277	-0,180	0,928	0,342	-0,153	0,896
Valor p	0,177	0,209	< 0,001	0,026	0,409	< 0,001	0,054	0,215	< 0,001	0,016	0,294	< 0,001
Coeficiente Variable	R2 (lineal) (%)			R2 (cuadrático) (%)			R2 (lineal) (%)			R2 (cuadrático) (%)		
	Voltaje	Firmeza	Masa	Voltaje	Firmeza	Masa	Voltaje	Firmeza	Masa	Voltaje	Firmeza	Masa
Firmeza	2,2	-	-	2,2	-	-	2,9	-	-	3,2	-	-
Valor p	> 0,05	-	-	> 0,05	-	-	0,241	-	-	0,474	-	-
Masa	18,4	14,2	-	40,7	24,5	-	13,2	6,1	-	19,7	6,1	-
Valor p	0,126	0,184	-	0,056	0,213	-	0,010	0,086	-	0,006	0,233	-
Diámetro	14,7	12,8	96,0	42,8	23,0	96,1	7,7	3,3	86,2	10,6	5,1	86,5
Valor p	0,177	0,209	< 0,001	0,046	0,237	< 0,001	0,054	0,215	< 0,001	0,077	0,300	< 0,001

(*) n = 14; (**) n = 49.

Fuente: Elaboración propia.

